

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ZONAS DE VIDA
DE HOLDRIDGE EN COSTA RICA PARA EL PERIODO 2061-2080.

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA
FORESTAL CON EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA.

MARÍA LUISA JIMÉNEZ FERNÁNDEZ

CARTAGO, COSTA RICA

JUNIO, 2019



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ZONAS DE VIDA
DE HOLDRIDGE EN COSTA RICA PARA EL PERIODO 2061-2080.

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA
FORESTAL CON EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA.

MARÍA LUISA JIMÉNEZ FERNÁNDEZ

CARTAGO, COSTA RICA

JUNIO, 2019

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE EN COSTA RICA PARA EL PERIODO 2061-2080.

María Luisa Jiménez Fernández*

Resumen

Se modelaron cambios en las zonas de vida para Costa Rica para el periodo 2061-2080, según 18 escenarios provenientes de 10 modelos de circulación general (MCG) y dos rutas de concentración representativas, RCP 4.5 y RCP 8.5. A partir de información climática de WorldClim se utilizaron variables de precipitación y biotemperatura para generar nuevas zonas de vida correspondientes al periodo en estudio, así mismo se estimaron las anomalías en precipitación y temperatura para el mismo periodo. En ambos escenarios de RCP la zona de vida Páramo pluvial Subalpino desaparece en el 100% de los modelos generados, además de la aparición de la zona de vida Bosque seco Premontano la cual abarcaría 623,77 km² del territorio nacional, ubicándose en la costa del pacífico norte de Guanacaste. Los modelos y escenarios evaluados proyectan una gran dinámica en la distribución de las zonas de vida para el periodo 2061-2080, donde el escenario con mayor impacto es el RCP 8.5 en cualquier modelo evaluado.

Palabras claves: Biotemperatura, Proyección, Modelos de circulación general, Rutas de concentración representativas, Anomalías.



Esta obra cuenta con una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional License.

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE LIFE ZONES OF HOLDRIDGE IN COSTA RICA FOR THE PERIOD 2061-2080.

María Luisa Jiménez Fernández*

Abstract

In this study, the changes in life zones in Costa Rica were modeled in the period of 2061-2080, by using 18 scenarios from 10 general circulation models (GCM) and two representative concentration pathways, the RCP 4.5 and RCP 8.5. In order to generate new life zones and estimate anomalies in precipitation and temperature corresponding to the studied period, climate information from WorldClim was taken and the variables of precipitation and biotemperature were used. In both RCP scenarios, the Subalpine Pluvial Paramo life zone disappears in 100% of the models generated, in addition to the appearance of the Premontane Dry Forest life zone which would cover 623.77 km² of the national territory, which is located on the Pacific north coast of Guanacaste. According to the evaluated models and scenarios, it's projected a great dynamic in the distribution of life zones for the period 2061-2080, where the scenario with the greatest impact is the RCP 8.5 in every model that was evaluated.


Keywords: Biotemperature, Projection, General circulation models, Representative concentration pathways, Anomalies.

*Jiménez Fernández, ML. 2019. Impacto Del Cambio Climático En Las Zonas De Vida De Holdridge En Costa Rica Para El Periodo 2061-2080. Proyecto de graduación de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 47p.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTOS DE GRADUACION

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por el Ing. Dorian Carvajal Vanegas M. Sc, la Máster. Ana Julieta Calvo Obando y el Máster. Vladimir Jiménez Salazar como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

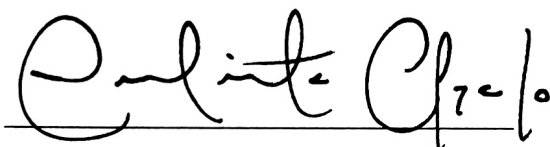
Miembros del Tribunal Evaluador



Ing. Dorian Carvajal Vanegas M.Sc.

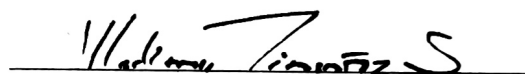
Director de tesis

Coordinador Trabajos Finales de Graduación



Máster. Ana Julieta Calvo Obando

Profesor Lector



Máster. Vladimir Jiménez Salazar

Profesor Lector



María Luisa Jiménez Fernández

Estudiante

Dedicatoria

*A mi familia y amigos
por todo el apoyo incondicional
que recibí durante mi proceso educativo,
al igual que a todas las personas
que de una u otra forma me brindaron su apoyo
y ayuda cuando más lo necesite,
gracias a todos ellos logré alcanzar una meta
y concluir una gran etapa de mi vida.*

Agradecimientos

Quiero agradecerle principalmente a mi tutor Dorian Carvajal, el cual creyó en mí para desarrollar este estudio y a su vez tuvo la enorme paciencia de acompañarme y guiarme durante este proceso, aunque en ocasiones no nos entendiéramos de la mejor manera, siempre estuvo para ayudarme a crecer como futura profesional, gracias profe.

A la escuela por su apoyo brindado a lo largo de mi estancia, por apoyarme en mi crecimiento como estudiante además de su ayuda brindada en actividades como congresos y voluntariados, así mismo a todas las personas que me encontré en el camino que de una u otra forma aportaron su granito de arena para que yo cumpliera con este objetivo implantado desde el primer semestre.

A Arturito que me ha ayudado desde siempre, que sin su apoyo tecnológico y su amistad no hubiese logrado mucho de lo que logré alcanzar hasta el día de hoy, por estar en esos momentos cuando necesitaba a un amigo, gracias por tanto apoyo.

A mis amigos forestales que terminaron siendo hermanos para mí Andrea, Marian, Arleth, Joseline, Nikole, Juan José, Brayan, Jorge y Roberto, que me acompañaron durante tantos momentos, con lo que aprendí muchísimo y aun lo sigo haciendo, porque esa amistad que cultivamos por años siga prosperando de la mejor manera.

A ese grupo de personas tan diferentes, pero tan compatibles con mi carácter que encontré en una nueva carrera Paulina, María José, Alcides, Giuliano, Esteban que me enseñaron que las habilidades blandas es algo en lo que debo definitivamente practicar más, gracias por todo lo que me han enseñado y por haberme acogido tan bien en un ambiente estudiantil totalmente nuevo para mí.

A todo el personal de mi segunda casa de estudio y trabajo, los funcionarios de la oficina de Administración de Empresas Nocturna “Casa Verde” en San José, por tantas enseñanzas, apoyo y cariño mostrado en mi periodo como asistente de la oficina, especialmente a Lorena, María y Anita.

Y por último, pero no menos importante a mi familia que estuvieron siempre a la distancia, pero siempre brindándome el apoyo que necesitaba en el momento preciso, por esa dote de confianza que siempre me han sabido externar, gracias porque fueron un pilar fundamental en este logro.

A TODOS INFINITAS GRACIAS.

Tabla de contenidos

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE DE CUADROS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE ANEXOS	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIAL Y METODOS	4
2.1. ÁREA DE ESTUDIO	4
<i>2.1.1. Datos climáticos</i>	<i>4</i>
2.2. MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL (MCG) Y ESCENARIOS DE RUTAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS (RCP)	5
2.3. ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA.	7
2.4. ZONAS DE VIDA DE HOLDRIDGE	7
2.5. VALIDACIÓN MODELO PERIODO 1960-1990.	10
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
3.1. ZONAS DE VIDA PARA EL PERIODO 1960-1990.	12
3.2. ANOMALÍAS PARA EL PERIODO 1960-1990.	13
3.3. TASAS DE CAMBIO EN LOS ESCENARIOS FUTUROS.	15
4. CONCLUSIONES	23
5. RECOMENDACIONES	24
6. BIBLIOGRAFÍA	25
7. ANEXOS	30

Índice de cuadros

Cuadro 1. Modelos de circulación general empleados y su clasificación para reproducir las condiciones climáticas de América Central.....	6
Table 1. Models of general circulation used and their classification to reproduce the climatic conditions of Central America.....	6
Cuadro 2. Código según rango de precipitación.....	8
Table 2. Code according to precipitation range.....	8
Cuadro 3. Código según rango de biotemperatura.....	9
Table 3. Code according to biotemperature range.....	9
Cuadro 4. Código según piso altitudinal por rangos de temperatura.....	9
Table 4. Code according to altitudinal floor by temperature ranges.....	9
Cuadro 5. Código según piso altitudinal por formación vegetal.....	10
Table 5. Code according to altitudinal floor by plant formation.....	10
Cuadro 6. Rangos e indicaciones para el estadístico kappa (k).....	11
Table 6. Ranges and indications for the kappa statistic (k).....	11
Cuadro 7. Tasas de cambio porcentual en la distribución de las zonas de vida para el periodo 2061-2080 de diez modelos de circulación general evaluados para el RCP 4.5.....	16
Table 7. Percentage change rates in the distribution of life zones for the 2061-2080 period of ten models of general circulation evaluated for RCP 4.5.....	16
Cuadro 8. Tasas de cambio porcentual en la distribución de las zonas de vida para el periodo 2061-2080 de ocho modelos de circulación general evaluados para el RCP 8.5.....	19
Table 8. Percentage change rates in the distribution of life zones for the 2061-2080 period of eight models of general circulation evaluated for RCP 8.5.....	19

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de Costa Rica en Centroamérica.....	4
Figure 1. Location of Costa Rica in Central América.	4
Figura 2. Mapa de zonas de vida en Costa Rica para el periodo de 1960-1990.....	12
Figure 2. Map of the life zones in Costa Rica for the 1960-1990 period.	12
Figura 3. Anomalías de temperatura y precipitación de diez modelos de circulación general bajo dos escenarios de emisiones para Costa Rica.	14
Figure 3. Temperature and precipitation anomalies of ten general circulation models under two emission scenarios for Costa Rica.	14
Figura 4. Mapas de zonas de vida para diez modelos de circulación general y el RCP 4.5 para el periodo 2061-2080.....	17
Figure 4. Maps of life zones for ten models of general circulation and RCP 4.5 for the period 2061-2080.	17
Figura 5. Mapas de zonas de vida para ocho modelos de circulación general y el RCP 8.5 para el periodo 2061-2080.....	21
Figure 5. Maps of life zones for eight models of general circulation and RCP 8.5for the period 2061-2080.	21

Índice de anexos

Anexo 1. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “cnmr_cm5” RCP 4.5	30
Anexo 2. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “cnmr_cm5” RCP 8.5	31
Anexo 3. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “cesm1_cam5_1fv2” RCP 4.5	32
Anexo 4. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “ccsm4” RCP 4.5	33
Anexo 5. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “ccsm4” RCP 8.5	34
Anexo 6. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “mpi_esm_lr” RCP 4.5	35
Anexo 7. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “mpi_esm_lr” RCP 8.5	36
Anexo 8. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “mri_cgcm3” RCP 4.5	37
Anexo 9. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “mri_cgcm3” RCP 8.5	38
Anexo 10. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “giss-e2-r” RCP 4.5	39
Anexo 11. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “giss-e2-r” RCP 8.5	40
Anexo 12. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “miroc_5” RCP 4.5	41
Anexo 13. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “miroc” RCP 8.5	42
Anexo 14. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “inmcm4” RCP 4.5	43

Anexo 15. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “inmcm4” RCP 8.5	44
Anexo 16. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “hadgem2-cc” RCP 4.5	45
Anexo 17. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “hadgem2-cc” RCP 8.5	46
Anexo 18. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “gfdl-esm2g” RCP 4.5	47

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, según el artículo 1 de la Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático (CMNUCC) “se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (Naciones Unidas, 1992; Jiménez, 2009, Alfaro et al., 2013).

Al ser Costa Rica un país de pequeñas dimensiones en comparación a sus vecinos Nicaragua y Panamá tiene claro la relevancia que conlleva estar a la vanguardia sobre el tema del cambio climático y las políticas públicas que se deben de desarrollar para mitigar el impacto que se prevé tenga a futuro el cambio climático no solo sobre el área ambiental sino también sobre el área social, comercial, agraria, etc; donde las políticas de cambio climático, tanto en mitigación como en adaptación, deben ser vistas como políticas de estado, y no del gobierno de turno. (MINAE et al., 2018)

Costa Rica se ha visto afectada en los últimos años por el cambio climático, especialmente la provincia de Guanacaste, que ha experimentado sequías con períodos superiores a los normalmente establecidos en la estación seca (DCC, 2012). Esto afecta tanto a los ecosistemas como a las actividades de ganadería, agricultura (Rodríguez, 2002; Jiménez, 2009) y recurso hídrico (Jiménez & Vindas, 2011), lo cual tiene un efecto en la población (IPCC, 2014). Ante esta situación es necesario realizar estudios que generen información del posible efecto del cambio climático en los ecosistemas, haciendo uso de modelos climáticos a futuro los cuales son mejor representados por modelos de circulación General (MCG). (Benioff, Guill, & Lee, 1996; Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH), 2008).

Los MCG son modelos matemáticos que simulan e incorporan en sus ecuaciones la dinámica de los procesos físicos y de las interacciones del sistema climático, y se emplean en la obtención de información valiosa y precisa para la toma de decisiones y generación de políticas gubernamentales para así poder tomar acciones a futuro (IPCC, 2014).

Estos requieren como datos de entrada los escenarios de emisiones de los GEI y aerosoles, los cuales están relacionadas con factores socioeconómicos tales como el aumento de la población, el crecimiento económico, el costo y la disponibilidad de fuentes de energía, las pautas de producción y consumo, y cambios de prácticas en el uso de la tierra. Por lo tanto, los MCG proyectan la respuesta de muchas variables climáticas en función de un conjunto de escenarios de emisiones de GEI. (CRRH, 2008).

En el Quinto informe de Evaluación del Cambio Climático se agregan los escenarios de rutas de concentración representativas (RCP) por sus siglas en inglés, que se definen por su forzamiento radioactivo total, esta es una medida acumulativa de las emisiones humanas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de todas las fuentes expresadas en vatios por metro cuadrado para el 2100. Los RCP se clasifican en cuatro escenarios que van desde un escenario de menor impacto (RCP 2.6) hasta la que prevé un muy alto impacto (RCP 8.5), manteniendo dos escenarios de impacto medio (RCP 4.5 y RCP 6) (IPCC, 2017).

Desde un punto de vista ecológico se puede intuir un grado de afectación para los ecosistemas más sensibles o con mayores probabilidades de verse alterados por variaciones en el clima, que influye directamente en su funcionalidad (Rodríguez, 2002; Jiménez, 2009). El sistema de zonas de vida de Holdridge es un modelo que caracteriza la vegetación de los ecosistemas terrestres a partir de parámetros de fácil obtención como precipitación y temperatura (Holdridge, 1967). Esto lo hace una herramienta útil en la determinación del impacto que puede generar el cambio climático en las zonas de vida (Yates, Kittel, & Cannon, 2000; Chen, Zhang, & Li, 2003; Jiménez, Chain, & Locatelli, 2010; Carvajal, 2017), ya que se basa en datos cuantitativos favoreciendo el análisis en función de registros georreferenciados (Lugo et ál, 1999; Rosito et ál, 2012).

Diversos autores han utilizado el modelo de zonas de vida de Holdridge para predecir cambios futuros en la vegetación, Jiménez et al. (2010), analizaron la resiliencia y el impacto futuro del cambio climático en las zonas de vida para Centroamérica, Fan et al. (2012), estimaron los cambios de cobertura entre las transiciones de los biomas en la meseta de Loes en China y Khatun et al. (2013), estudiaron el impacto del cambio climático en los bosques de Centroamérica para el año 2100.

En los dos últimos decenios se han elaborado diversos estudios que hacen uso de modelos de circulación regionales o globales y escenarios propuestos en el Informe especial sobre escenarios de emisiones (SRES) del IPCC, para el análisis de proyecciones de la influencia o impacto que puede generar el cambio climático a futuro (Yates et al., 2000; Zheng et al., 2006; Jiménez et al., 2010; Fan et al., 2012; Khatun et al., 2013). Dadas las implicaciones que trae consigo el cambio climático, el objetivo de este estudio es modelar los cambios en las zonas de vida para Costa Rica, según diferentes modelos y escenarios de cambio climático y así poder determinar las posibles variaciones en las zonas de vida a futuro.

2. MATERIAL Y METODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio está conformada por la totalidad de la superficie terrestre de Costa Rica, la cual cuenta con una extensión total de 51 100 km², ubicada entre las coordenadas WGS84 (-82.55, -85.98) y (8.04, 11.22). La precipitación promedio anual para el país oscila entre los 1000 – 3000 mm, pero algunas zonas pueden llegar a presentar hasta 8000 mm anuales, cuenta con una estación seca (diciembre-abril) y una estación lluviosa (mayo-noviembre) (FAO, 2012).



Figura 1. Ubicación de Costa Rica en Centroamérica.

Figure 1. Location of Costa Rica in Central América.

2.1.1. Datos climáticos

Para la elaboración de la línea base se emplearon datos correspondientes a las variables climáticas temperatura y precipitación de WorldClim, con resolución espacial de 1 km², para el periodo 1960-1990 (Fick & Hijmans, 2017); las mismas se procesaron en los programas ArcGis versión 10.3 y Qgis 3.2.

2.2. Modelos de circulación general (MCG) y Escenarios de Rutas de Concentración representativas (RCP)

Para las proyecciones futuras de clima, se utilizaron los datos de precipitación y temperatura del periodo 2061-2080, para esto, se hizo uso de diez MCG para Centroamérica que tuviesen datos disponibles en la página oficial de WorldClim, los mismos se seleccionaron según el ranking elaborado por Hidalgo y Alfaro (2015) donde se escogieron los modelos que estuviesen mejor posicionados en el Ranking, esto por representar mejor los datos de precipitación y temperatura de Centroamérica a finales del siglo XX. (cuadro 1).

En este estudio se emplearon dos escenarios de rutas de concentración representativas o RCP, el escenario RCP 4.5 el cual describe un escenario intermedio que apunta a una estabilidad de los gases de efecto invernadero después del año 2100 y el RCP 8.5 que es un escenario de alto impacto el cual nos dirige a un escenario con muy altas emisiones de gases de efecto invernadero. (IPCC, 2014; IPCC, 2017). Los datos obtenidos se procesaron en el programa ArcGis 10.3, haciendo uso de herramientas de geoprocreso y de la calculadora ráster.

Cuadro 1. Modelos de circulación general empleados y su clasificación para reproducir las condiciones climáticas de América Central.

Table 1. Models of general circulation used and their classification to reproduce the climatic conditions of Central America.

Clasificación	Modelo	Centro de modelado
3	cnrm_cm5	Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM)
5	cesm1_cam5_1_fv2	Centro Euro-Mediterraneo per-I Cambiamenti Climatici (CMCC)
13	ccsm4	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCMA)
15	mpi_esm_lr	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
16	mri_cgcm3	Meteorological Research Institute (MRI)
27	giss_e2_r	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)
29	miroc5	Agency for Marine-Earth Science and Technology. (MIROC)
31	inmcm4	Institute for Numerical Mathematics (INM)
32	hadgem2_cc	Met Office Hadley Centre (HadCM-HADGM)
43	gfdl_esm2g	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)

Fuente. Hidalgo y Alfaro (2015)

2.3. Anomalías de precipitación y temperatura.

Haciendo uso de los de datos para el periodo 2061-2080 de precipitación y temperatura media anual, se calcularon las anomalías de ambas variables para diez modelos y dos RCP's analizados; empleando las ecuaciones 1 y 2 para determinar cada una de las anomalías.

$$\mathbf{Anomalía}_{temp} = \mathbf{Temp}_{fut} - \mathbf{Temp}_{act} \quad (1)$$

Donde:

$Anomalía_{temp}$ = Anomalía de temperatura media anual (°C)

$Temp_{fut}$ = Temperatura media anual futura (°C)

$Temp_{act}$ = Temperatura media anual periodo 1960-1990 (°C)

$$\mathbf{Anomalía}_{prec} = \frac{\mathbf{Prec}_{fut} - \mathbf{Prec}_{act}}{\mathbf{Prec}_{act}} * \mathbf{100} \quad (2)$$

Donde:

$Anomalía_{prec}$ = Anomalía de precipitación anual (%)

$Prec_{fut}$ = Precipitación media anual futura (%)

$Prec_{act}$ = Precipitación media anual periodo 1960-1990 (%)

2.4. Zonas de vida de Holdridge

Se modelaron mapas de zonas de vida de Holdridge para el periodo 1960-1990 y para dos escenarios de rutas de concentración según 10 MCG para el periodo 2061-2080, esto a partir de capas de precipitación, biotemperatura y piso altitudinal, de acuerdo con la clasificación de zonas de vida elaborada por Holdridge; se le asignó un código a cada variable haciendo uso de la metodología elaborada por Jiménez et al. (2010).

Para la variable precipitación se utilizaron datos promedio anuales; los mismos se reclasificaron en siete rangos acordes a lo establecido en el diagrama de zonas de vida de Holdridge (Cuadro 2):

Cuadro 2. Código según rango de precipitación.

Table 2. Code according to precipitation range.

Código	Rango de Precipitación (mm)
1	0 – 125
2	125 – 250
3	250 – 500
4	500 – 1000
5	1000 – 2000
6	2000 – 4000
7	4000 – 8000*

En el caso de la variable biotemperatura se emplearon los datos de temperatura mínima y máxima con el fin de generar capas de temperatura media por mes para el área de estudio; además se elaboró una capa ráster con las latitudes correspondientes al área de estudio, diseñando una malla de puntos con una resolución de 1 km, una vez se obtuvo la malla de puntos se la latitud del pixel haciéndose uso de la calculadora de campos en el programa Qgis 3.2, por último se rasterizó esta capa y se determinó la biotemperatura mensual aplicando la siguiente fórmula:

$$t_{bio} = t_{med} - \frac{(3 * \text{grados latitud})}{100} * (t - 24)^2 \quad (3)$$

Donde:

t_{bio} = biotemperatura mensual en °C

t_{med} = temperatura media mensual en °C

A partir de la biotemperatura mensual se calculó la biotemperatura anual, esta se reclasificó en siete rangos acorde a lo establecido por Holdridge en su diagrama para la clasificación de zonas de vida (cuadro 3):

Cuadro 3. Código según rango de biotemperatura.

Table 3. Code according to biotemperature range.

Código	Rango de Biotemperatura (°C)
10	0 – 1.5
20	1.5 – 3
30	3 – 6
40	6 – 12
50	12 – 17
60	17 – 24
70	24 – 30

En el caso de la variable piso altitudinal se reclasificaron los datos de biotemperatura en cinco rangos (Cuadro 4) de acuerdo con las biotemperaturas anuales según los pisos altitudinales propuestos por Holdridge:

Cuadro 4. Código según piso altitudinal por rangos de temperatura

Table 4. Code according to altitudinal floor by temperature ranges

Código	Rango de Biotemperatura (°C)	Piso Altitudinal
100	24 – 30	Basal
200	17 – 24	Premontano
300	12 – 17	Montano bajo
400	6 – 12	Montano
500	3 – 6	Subalpino

Finalmente se determinaron las zonas de vida sumando los valores clasificados en las variables de precipitación (P), biotemperatura (Tb) y piso altitudinal (Pa) donde al realizarse la suma de estas tres variables se obtiene un código (cuadro 5) que representa cada zona de vida encontrada, así como el piso altitudinal donde se localiza, cumpliendo con los rangos previamente establecidos; manejando únicamente las zonas de vida puras sin hacer uso de las transiciones que hay entre y para cada una de ellas.

Cuadro 5. Código según piso altitudinal por formación vegetal**Table 5.** Code according to altitudinal floor by plant formation

Código	Formación Vegetal	Piso altitudinal	Abreviatura
175	Bosque seco		bs-T
176	Bosque húmedo	Basal	bh-T
177	Bosque muy húmedo		bmh-T
264	Bosque seco		bs-P
265	Bosque húmedo	Premontano	bh-P
266	Bosque muy húmedo		bmh-P
267	Bosque pluvial		bp-P
355	Bosque húmedo		bh-MB
356	Bosque muy húmedo	Montano bajo	bmh-MB
357	Bosque pluvial		bp-MB
444	Bosque húmedo		bh-M
445	Bosque muy húmedo	Montano	bmh-M
446	Bosque pluvial		bp-M
536	Páramo pluvial	Subalpino	pp-SA

2.5. Validación modelo periodo 1960-1990.

Para la validación de la línea base de zonas de vida se utilizó el mapa actual de zonas de vida de Costa Rica (CCT & MAG, 2004), haciéndose uso del estadístico kappa (k), el cual compara la similitud que hay entre dos mapas de vegetación, el generado para el periodo de 1960-1990 y el mapa actual de Zonas de vida para Costa Rica.

Chuvieco (2010), indica que el coeficiente Kappa está basado en generar un punto de comparación entre un mapa existente y un mapa elaborado, tomando en cuenta que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar para delimitar el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios.

Landis y Koch (1977), agrupan el estadístico kappa en 6 rangos (cuadro 6) al cual le asignan una indicación según sea su porcentaje de concordancia; el estadístico kappa

mantiene un rango de 0 a 1, donde 1 es equivalente a la perfección en cuanto a concordancia o similitud de los datos comparados y 0 es utilizado cuando no existe concordancia o similitud en los datos.

Cuadro 6. Rangos e indicaciones para el estadístico kappa (*k*).

Table 6. Ranges and indications for the kappa statistic (*k*).

Rango	Indicación
0,70 – 1,00	Perfecto
0,61 – 0,80	Muy bueno
0,41 – 0,60	Bueno
0,21 – 0,40	Regular
0,01 – 0,20	Malo
< 0,00	Pésimo

Para realizar el cálculo de este estadístico, se rasterizó la capa de zonas de vida para Costa Rica obtenida del ATLAS de Costa Rica 2014, por lo que el estadístico se aplicó únicamente entre zonas de vida no transicionales. Una vez rasterizada la capa se realizó el cálculo del estadístico *k* haciendo uso de la herramienta de GRASS “r. kappa” de QGIS versión 3.2, que calcula el error de la matriz y el parámetro kappa para la evaluación de precisión del resultado de la clasificación.

3. Resultados y discusión

3.1. Zonas de vida para el periodo 1960-1990.

Se modelaron las zonas de vida para el periodo 1960-1990 en el cual se obtuvieron 12 zonas de vida (Figura 2) que abarcan desde el “bs-T” en el Pacífico Norte hasta el “pp-SA” en las zonas más altas de la Cordillera de Talamanca; siendo predominantes principalmente tres tipos de bosque: “bh-T” 33,8%, “bmh-P” 29,2% y “bs-T” un 13,9%.

Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 1960-1990.

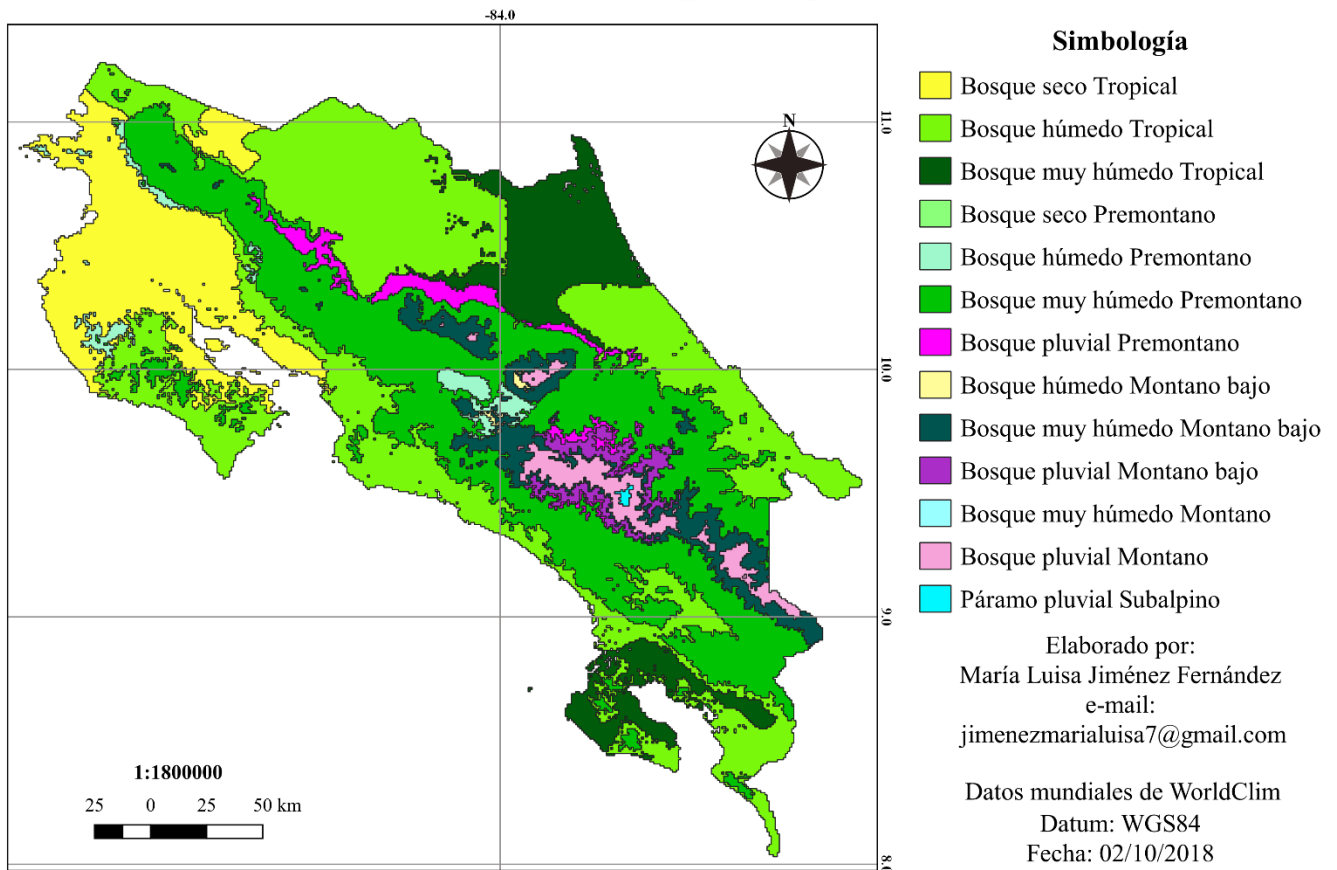


Figura 2. Mapa de zonas de vida en Costa Rica para el periodo de 1960-1990.

Figure 2. Map of the life zones in Costa Rica for the 1960-1990 period.

Las zonas de vida modeladas en este estudio para el periodo 1960-1990, arrojaron las mismas zonas de vida presentes en el mapa actual de zonas de vida para Costa Rica (CCT & MAG, 2004), al comparar ambos mapas se obtuvo un valor de kappa de 0,45, que establece una concordancia de regular a buena (Landis y Koch, 1977). Es importante aplicar una estimación de la calidad para evaluar de este modo la exactitud temática del

mapa base, proporcionando al lector una medida cuantitativa de la calidad en cuanto a la magnitud de la concordancia o similitud entre los mapas (Zhang et al, 2006; Lizarazo, 2013).

3.2. Anomalías para el periodo 1960-1990.

Se calcularon las anomalías de temperatura y precipitación para el periodo 2061-2080, para diez modelos de circulación general (MCG) y dos escenarios de emisión correspondientes al RCP 4.5 y RCP 8.5, la Figura 3 muestra que ambos escenarios pronostican un aumento en la temperatura, en el escenario de emisión RCP 4.5 se tienen variaciones que van desde un aumento en 2,30 °C para el modelo “inmcm4” hasta 3,65°C en el modelo “cesm1_cam5_1fv2”; por su parte, el escenario de emisión RCP 8.5 el aumento va de 2,55 °C para el modelo “ccsm4” hasta 4,68 °C en el modelo “hadgem2-cc”.

Varios autores muestran una clara tendencia al aumento de temperaturas en diferentes periodos, donde se proyecta aumentos de entre 3°C y 4°C para el periodo 2050-2099, entre 1°C y 5°C para el año 2080 y de 2°C a 4°C para el año 2100, mientras que las precipitaciones pueden disminuir de forma general para todo Centroamérica (Parry et al, 2007; Hidalgo et al, 2013; IPCC, 2017), esta tendencia se ve claramente reflejada en la figura 3, donde se puede observar independientemente del modelo evaluado el aumento en temperatura, siendo este acorde a las proyecciones antes mencionadas.

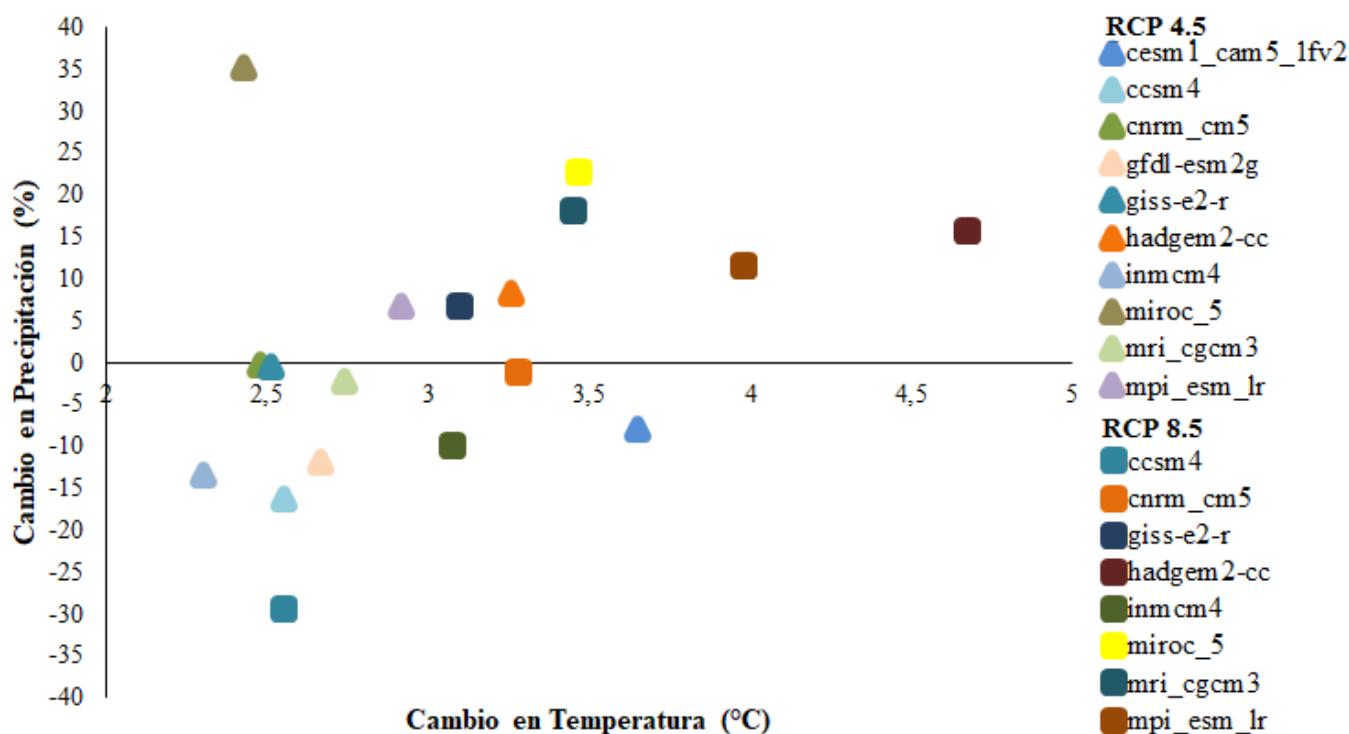


Figura 3. Anomalías de temperatura y precipitación de diez modelos de circulación general bajo dos escenarios de emisiones para Costa Rica.

Figure 3. Temperature and precipitation anomalies of ten general circulation models under two emission scenarios for Costa Rica.

Las anomalías de precipitación varían según el modelo y RCP utilizado, para el escenario de emisión RCP 4.5 se proyectan disminuciones en la precipitación de hasta un 16,32% en el modelo “ccsm4”, mientras que en el modelo “miroc_5” se prevén aumentos de hasta un 35,25%; los resultados para el escenario de emisión RCP 8.5, se tienen valores de disminución de la precipitación desde un 29,40% para el modelo “ccsm4” y aumentos de hasta un 22,67% en el modelo “miroc_5”.

Proyecciones para Centroamérica indican que las precipitaciones presentaran una tendencia a disminuir, influenciada principalmente por una potencial intensificación del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Castillo et al 2018), además, Hidalgo et al (2013) proyectan disminuciones de hasta 10% en las precipitaciones para el horizonte CC2 que abarca el periodo 2050-2099, lo cual indica que las sequias severas podrían verse aumentadas significativamente siendo consistente con un desplazamiento hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCT). Maurer et al (2017), al

respecto señala que la “sequía de mediados de verano” implicaría una disminución de hasta un 9,6% en la precipitación media anual para toda Centroamérica.; por su parte Castillo, et al (2018), señalan que las variaciones sufridas en los sistemas árticos podrían generar que para la estación seca se presenten disminuciones en las precipitaciones.

3.3.Tasas de cambio en los escenarios futuros.

Se modelaron zonas de vida para cada uno de los diferentes escenarios y modelos seleccionados, donde independientemente del modelo evaluado el mayor cambio en zonas de vida en cuanto a pérdida se da en el bs-T, , bmh-T, bmh-MB, bp-M y el pp-SA, donde todos los modelos tienden a la pérdida de área en estas zonas de vida . En términos de aumentos porcentuales de áreas, para el RCP 4.5 (cuadro 7), las zonas de vida bh-P en el modelo “cesm1_cam5_1fv2”, el bp-P modelo “miroc_5” y el bmh-M modelo “ccsm4” presentan incrementos de 1188,56%, 1246,02% y 4100,95% respectivamente, lo cual se debe a la variación en las condiciones de temperatura que se proyectan para el periodo en estudio.

Cuadro 7. Tasas de cambio porcentual en la distribución de las zonas de vida para el periodo 2061-2080 de diez modelos de circulación general evaluados para el RCP 4.5.

Table 7. Percentage change rates in the distribution of life zones for the 2061-2080 period of ten models of general circulation evaluated for RCP 4.5.

Zona de vida	cnrm_cm5	cesm1_cam5_1fv2	ccsm4	mpi_esm_lr	mri_cgcm3	giss-e2-r	miroc_5	inmcm4	hadgem2-cc	gfdl-esm2g
Bosque seco Tropical	-81,70	-86,29	-14,20	-95,09	-88,13	-70,43	-99,98	-39,81	-94,98	-57,31
Bosque húmedo Tropical	-26,79	-47,36	25,66	-37,47	-32,31	-38,28	-57,95	-24,24	-45,57	-32,52
Bosque muy húmedo Tropical	-65,15	-96,52	-80,20	-62,37	-80,40	-60,92	55,25	-91,15	-65,51	-96,67
Bosque seco Premontano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bosque húmedo Premontano	653,03	1188,56	849,89	512,29	720,63	876,49	-81,66	1036,98	673,98	1072,47
Bosque muy húmedo Premontano	46,32	63,43	-24,58	56,86	67,10	35,89	18,54	27,94	47,01	44,68
Bosque pluvial Premontano	301,55	225,51	-52,83	519,22	187,93	355,24	1246,02	63,00	677,27	98,16
Bosque húmedo Montano bajo	-51,33	-0,02	255,20	-100,00	-14,50	-69,74	-100,00	119,71	-100,00	132,86
Bosque muy húmedo Montano bajo	-20,94	-32,22	-22,71	-24,71	-23,42	-25,08	-54,19	-18,85	-34,16	-21,67
Bosque pluvial Montano bajo	-64,03	-96,62	-87,98	-68,77	-73,10	-49,36	58,47	-77,43	-54,74	-87,66
Bosque muy húmedo Montano	-100,00	1900,36	4100,95	-100,00	1500,36	-100,00	-100,00	3400,71	-100,00	4000,83
Bosque pluvial Montano	-57,75	-81,58	-62,09	-65,36	-64,01	-57,82	-55,33	-54,33	-71,69	-64,51
Páramo pluvial Subalpino	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00

Las zonas de vida que proyectan pérdidas superiores al 96% de sus áreas actuales para el RCP 4.5 son el bs-T en el modelo “miroc_5”, bmh-T en el modelo “gfdl-esm2g” y el bp-MB en el modelo “cesm1_cam5_1fv2”, además el bh-MB desaparece en los modelos “mpi_esm_lr”, “miroc_5” y “hadgem2-cc”, el bmh-M proyecta la desaparición de esta zona de vida en el 50% de los modelos evaluados para este RCP (cnrm_cm5, mpi_esm_lr, giss-e2-r, miroc_5 y hadgem2-cc) siendo la segunda zona de vida con mayor impacto negativo (figura 4).

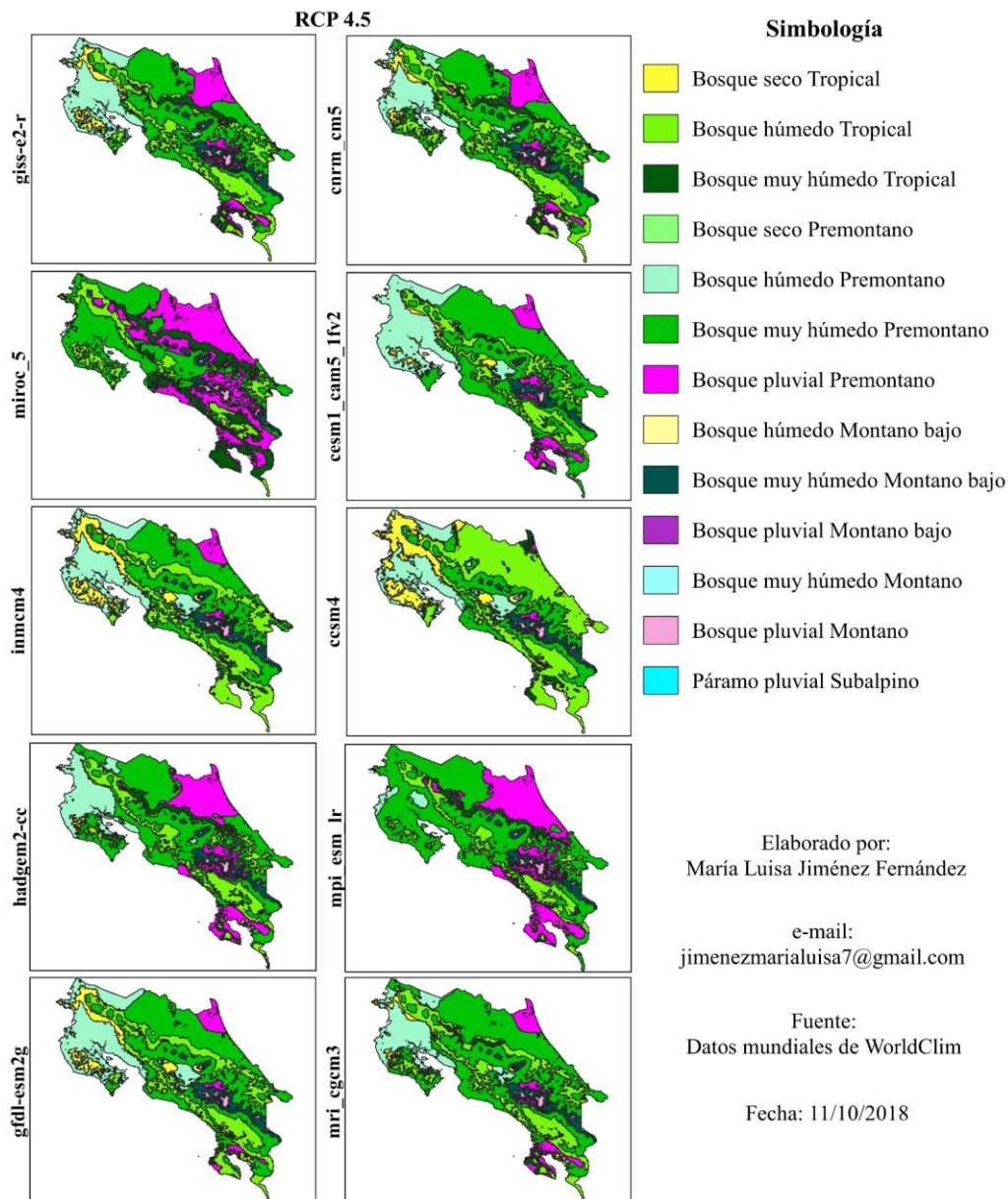


Figura 4. Mapas de zonas de vida para diez modelos de circulación general y el RCP 4.5 para el periodo 2061-2080.

Figure 4. Maps of life zones for ten models of general circulation and RCP 4.5 for the period 2061-2080.

Se proyecta la pérdida del 100% del área del pp-SA en todos los modelos evaluados para el periodo en estudio, esta zona de vida se localiza actualmente en las zonas altas de la Cordillera de Talamanca y se desplazaría al bp-M, el páramo es una zona amenazada no solo por su escasa área y distribución sino también por los diferentes servicios ecosistémicos que brinda en pisos altitudinales menores; Vargas (2012), menciona que el cambio climático tiene efectos sobre el balance hídrico y el almacenamiento de carbono en los páramos, donde aumentos en la temperatura pueden liberar el carbono almacenado en los suelos y que las actividades agrícolas con las altas temperaturas y precipitaciones pueden causar la rápida degradación de los suelos afectando todos los ecosistemas presentes en esta zona de vida.

Jiménez (2009), expone en sus resultados que para el 2080 las zonas de vida tendrán un mayor impacto con relación a los escenarios proyectados para el 2020, reflejando la pérdida de zonas de vida como el pp-SA, lo cual concuerda con nuestros resultados, siendo las que mayor afectación en cuanto a pérdida de área total se refiere. Además, se debe de tomar en cuenta el bajo nivel de resiliencia que presentan los páramos con respecto al grado de cambio en la composición florística, afectando tanto a la fauna como a las especies de flora que se encuentran actualmente en la zona (Vargas, 2012).

Con respecto al RCP 8.5 los modelos “ccsm4” y “hadgem2-cc” presentan los incrementos más extremos, el modelo “ccsm4” en las zonas de vida bh-P y bmh-M se proyectan incrementos de 1801,99% y 31047,27% respectivamente, mientras que para el modelo “hadgem2-cc” se esperan aumentos de 1113,14% para el bp-P y 1420,47%, como se observa en el cuadro 8.

Cuadro 8. Tasas de cambio porcentual en la distribución de las zonas de vida para el periodo 2061-2080 de ocho modelos de circulación general evaluados para el RCP 8.5.

Table 8. Percentage change rates in the distribution of life zones for the 2061-2080 period of eight models of general circulation evaluated for RCP 8.5.

Zona de vida	cnrm_cm5	ccsm4	mpi_esm_lr	mri_cgcm3	giss-e2-r	miroc_5	inmcm4	hadgem2-cc
Bosque seco Tropical	-93,74	-38,57	-99,26	-100,00	-86,33	-99,99	-73,57	-99,87
Bosque húmedo Tropical	-41,09	-57,28	-51,42	-51,27	-49,46	-57,33	-37,72	-59,86
Bosque muy húmedo Tropical	-82,69	-100,00	-70,16	-55,82	-56,81	-30,35	-95,91	-67,17
Bosque seco Premontano	-	623,77	-	-	-	-	-	-
Bosque húmedo Premontano	763,26	1801,99	442,08	51,63	950,55	36,47	1198,99	552,99
Bosque muy húmedo Premontano	67,72	37,49	65,74	69,58	23,67	57,11	47,95	31,93
Bosque pluvial Premontano	351,35	-88,18	774,95	890,47	732,26	1080,81	155,80	1113,14
Bosque húmedo Montano bajo	-46,07	1001,87	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	11,82	1420,47
Bosque muy húmedo Montano bajo	-95,83	-50,12	-34,40	-41,03	-38,85	-43,33	-24,43	-20,20
Bosque pluvial Montano bajo	149,72	-100,00	-89,98	-50,73	-29,10	-35,75	-86,71	-74,78
Bosque muy húmedo Montano	0,00	31047,27	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	1500,36	-100,00
Bosque pluvial Montano	-72,69	-97,79	-81,79	-76,67	-70,06	-75,18	-69,91	-88,41
Páramo pluvial Subalpino	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00	-100,00

Se proyecta la aparición de una nueva zona de vida para el RCP 8.5 en el modelo “ccsm4”, aquí aparece el Bosque seco Premontano (bs-P) con un área total de 623,77 km², la cual surge por una reducción de precipitación en la zona de vida Bosque húmedo Premontano ubicada en el Pacífico Norte, el bs-P se caracteriza por tener una temperatura media anual entre los 18°C y 24°C y una precipitación media entre 550 y 1100 mm anuales (Holdridge, 1967).

Las zonas de vida correspondientes al piso Premontano muestran una tendencia al aumento en más del 90% de los modelos evaluados, todo esto resultado del incremento en temperatura proyectado en todos los modelos de circulación general; Aguilar et al (2005) hacen referencia a una tendencia general al calentamiento por aumento en las temperaturas máximas y mínimas, lo que afecta la tendencia general de distribución de los ecosistemas amenazando principalmente zonas altitudinales menores y al Páramo pluvial Subalpino.

Jiménez (2009), muestra la aparición del Bosque muy seco Tropical (bms-T) y bs-P, generándose esta última por el desplazamiento de parte del área del bh-P, coincidiendo esta última zona con el escenario previsto para el modelo “ccsm_4”, lo cual se puede adjudicar al uso de escenarios similares dado que en este estudio se emplea el uso de los escenarios propuestos por el IPCC en el AR5 para el 2017, mientras que Jiménez emplea los escenarios A2 y B2 presentes en el reporte especial “Escenarios de emisión” para el 2000 haciendo uso del modelo regional PRECIS; además del manejo realizado a los datos de temperatura dados en ambos estudios; ya que en este estudio se establecieron las zonas de vida haciendo uso de la variable biotemperatura sin excluir datos mayores a 30°C o menores a 0°C, caso contrario a lo realizado en el estudio realizado por Jiménez.

En cuanto a disminución de área para el RCP 8.5, (figura 5) el modelo “ccsm4” presenta pérdidas superiores al 88% para las zonas de vida bmh-T, bp-P, bp-MB y bp-M, además el bs-T desaparece en el modelo “mri_cgcm3” y las zonas de vida Bosque húmedo Montano bajo y muy húmedo Montano desaparecen en un 33 y 42% respectivamente de los modelos evaluados (“mpi_esm_lr”, “mri_cgcm3”, “giss_e2_r”, “miroc5”, bmh-M también en el modelo “hadgem2_cc”).

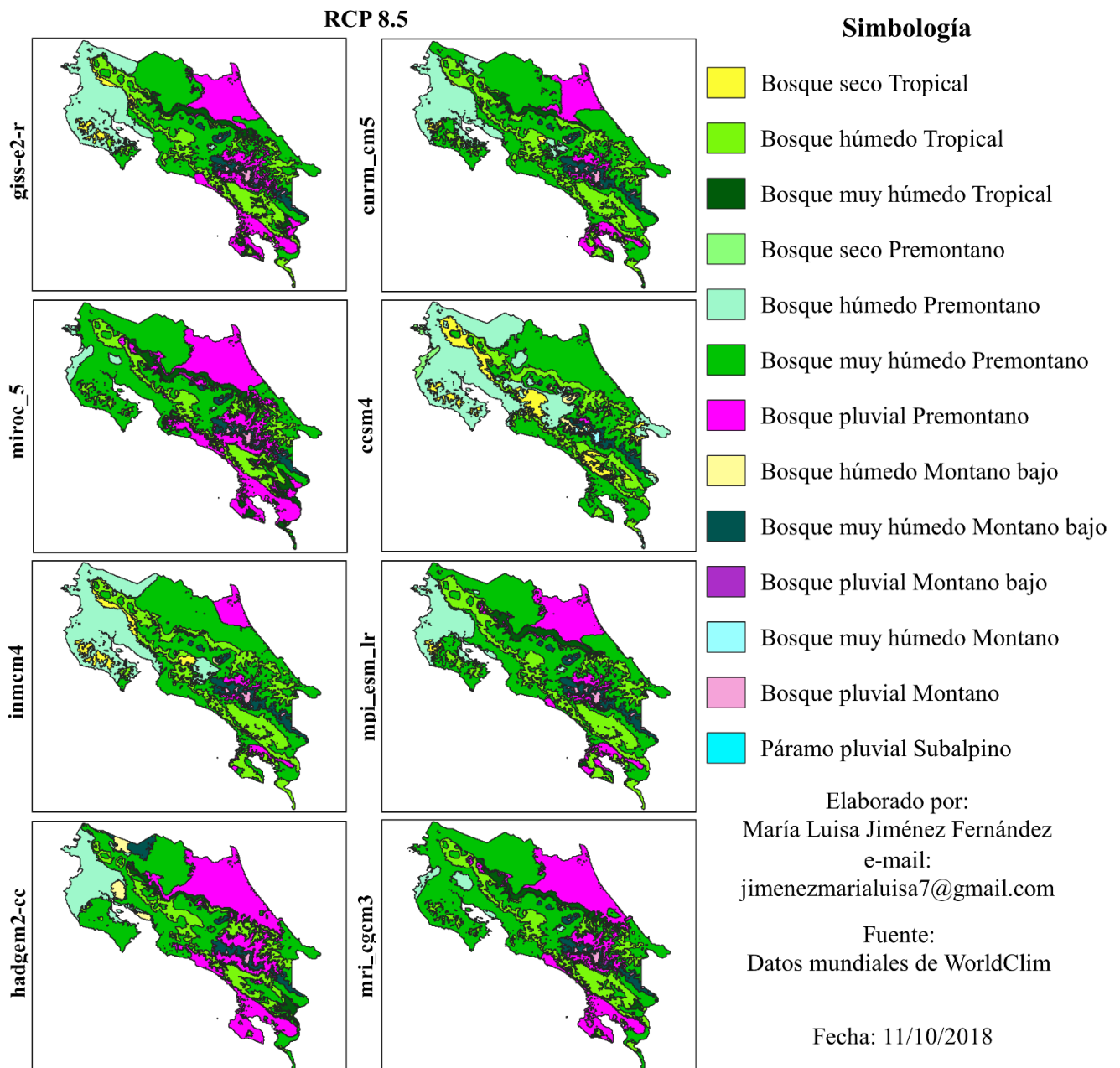


Figura 5. Mapas de zonas de vida para ocho modelos de circulación general y el RCP 8.5 para el periodo 2061-2080.

Figure 5. Maps of life zones for eight models of general circulation and RCP 8.5 for the period 2061-2080.

El Páramo pluvial Subalpino en el RCP 8.5 también desaparece por completo en todos los modelos evaluados, la pérdida de estas zonas de vida pueden tener un gran efecto a nivel ecológico, ya que según Alfaro et al, (2018) la generación y provisión de agua, la evapotranspiración de la vegetación, el contenido de humedad y materia orgánica de los suelos y los espejos de agua del Parque Nacional Chirripó pueden ser afectados por el calentamiento, lo cual repercutiría en la capacidad para retener y distribuir los procesos

hidrológicos, siendo esenciales como hábitats para las aves durante sus migraciones, y para que la hidratación de la fauna, en épocas de alta radiación (Cuesta et al., 2013).

En un estudio realizado por Karmalkar et al (2008), los autores sugieren que los efectos del cambio climático en Centroamérica, y más específicamente alrededor de Costa Rica serán más pronunciados en las elevaciones altas que en las tierras bajas; Jiménez et al (2010), mencionan que las zonas de vida con mayor afectación o con mayor vulnerabilidad serían aquellas de altitudes mayores, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en el presente estudio donde efectivamente a mayor piso altitudinal mayor disminución en el porcentaje de las áreas.

La elaboración de un nuevo mapa de zonas de vida a groso modo permite observar el impacto que el cambio climático puede tener sobre las actuales zonas de vida en el país, esto permite elaborar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático basados en proyecciones futuras analizadas en este estudio, siendo de gran ayuda y relevancia ya que permite determinar a partir de variables de fácil obtención la alteración que se podría reflejar a futuro en la distribución de las zonas de vida para el país; dando paso a futuras investigaciones que se pueden enfocar en el impacto del cambio climático en servicios ecosistémicos, en especies de flora con mayor riesgo, entre otras temáticas que sean de relevancia para el país.

4. CONCLUSIONES

- Se proyecta que para el periodo 2061-2080 según el RCP 4.5 la temperatura varíe entre 2,30°C y 3,65°C y en el RCP 8.5 varíe entre 2,55°C y 4,68°C.
- Los rangos de precipitación para el RCP 4.5 se proyecta una variación entre -16,32% y 35,25% generando en el mejor de los casos condiciones más húmedas, mientras que para el RCP 8.5 se esperan variaciones entre -29,40% y 22,67% ocasionando en el peor escenario condiciones futuras muchos más secas que las actuales.
- La zona de vida Páramo pluvial Subalpino desaparecerá en el 100% de los escenarios y modelos evaluados pasando a formar parte del piso altitudinal Montano.
- La segunda zona de vida con mayor impacto es el Bosque muy húmedo Montano, se proyecta que desaparecerá en el 56% de los escenarios evaluados.
- A nivel de piso altitudinal el principal desplazamiento se verá hacia las zonas de vida presentes en el piso altitudinal Premontano, aumentando considerablemente su extensión.
- El modelo “ccsm4” en el RCP 8.5, proyecta la aparición de una nueva zona de vida el Bosque seco Premontano, la cual abarcaría 623,77 km² del territorio nacional, ubicándose en la costa del pacifico norte de Guanacaste.
- Los modelos y escenarios evaluados proyectan una gran dinámica en la distribución de las zonas de vida para el periodo 2061-2080, donde el escenario con mayor impacto es el RCP 8.5 en cualquier modelo evaluado.

5. RECOMENDACIONES

- Los datos obtenidos en este estudio pueden emplearse para desarrollar políticas públicas que ayuden a evitar llegar a los resultados aquí generados, elaborando políticas o medidas de mitigación y adaptación al cambio climático.
- Se deben de promover estudios que generen proyecciones del impacto del cambio climático a futuro en diferentes zonas de importancia ecológica (impacto en reservas de agua, impacto en ecosistemas como el de manglar, zonas más sensibles a las variaciones de temperatura/precipitación, etc), con el fin de generar conocimiento que ayude a crear conciencia sobre nuestras acciones, así como políticas para todas las áreas afectadas.
- En estudios futuros se recomienda el uso del método de ensambles de modelos, para así incrementar la exactitud en los resultados con base en la combinación de proyecciones de múltiples modelos con baja correlación entre sí.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, A., Aymerich, N., Blanco, G., Bolaños, L., Campos, A., Matarrita, R. (2013). Guía de diseño bioclimático según clasificación de zonas de vida Holdridge.
- Alfaro, E., Veas-Ayala, N., Quesada-Román, A., & Hidalgo, H. (2018). Humedales del Parque Nacional Chirripó, Costa Rica: características, relaciones geomorfológicas y escenarios de cambio climático. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1436-1448. doi:10.15517/rbt.v66i4.31477 Recuperado de <https://medes.com/publication/138862>
- Benioff, R., Guill, S., Lee, J. (1996). *Vulnerability and adaptation assessments: An international handbook*. Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-009-0303-6 Recuperado de [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE_ID\]/detail.action?docID=3101532](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=3101532)
- Carvajal, D. (2017). Dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la subcuenca del río Tempisquito, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica.
- Castillo, R., Amador, J., Montero, R., & Duran, A. M. (2018). Cambios futuros de precipitación y temperatura sobre américa central y el caribe utilizando proyecciones climáticas de reducción de escala estadística. *Revista De Climatología*, (18), 1-12. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/322835391_Cambios_futuros_de_precipitacion_y_temperatura_sobre_America_Central_y_el_Caribe_utilizando_proyecciones_climaticas_de_reduccion_de_escal_estadistica
- CCT & MAG. (2004). Mapa de zonas de vida. En Atlas Digital de Costa Rica 2014. Editado por Edgar Ortiz Malavasi. EIFO. ITCR.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio* (3ª edición ed.). Barcelona, España: Editorial Ariel. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/366409360/Teledeteccion-Ambiental-Chuvieco>
- Chen, X., Zhang, X., & Li, B. (2003). The possible response of life zones in china under global climate change. *Global and Planetary Change*, 38(3), 327-337. doi:2878/10.1016/S0921-8181(03)00115-2

- Comité Regional de Recursos Hidráulicos, (CRRH). (2008). El clima, su variabilidad y cambio climático en costa rica. Recuperado de http://cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf
- Cuesta, F., Bustamante, M., Becerra, M., Postigo, J., & Peraldo, M. (2013). Panorama andino sobre cambio climático: vulnerabilidad y adaptación en los Andes tropicales. *La Revista Agraria*, (153), 15. Recuperado de http://repositorio.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/76000/2018_20.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- DCC. (2012). Plan de acción estrategia nacional de cambio climático. Recuperado de http://cambioclimaticocr.com/biblioteca-virtual/cat_view/2-publicaciones-sobre-cambio-climatico?limitstart=0
- Fan, Z., Li, J., & Yue, T. (2013). Land-cover changes of biome transition zones in loess plateau of china. *Ecological Modelling*, 252, 129-140. doi: 2878/10.1016/j.ecolmodel.2012.07.039
- FAO. (2012). Geografía de Costa Rica. Recuperado de <http://www.fao.org/forestry/country/18310/en/cri/>
- Fick, S. E., Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: Nuevas superficies climáticas de resolución espacial de 1 km para áreas terrestres globales. *revista internacional de climatología*. Recuperado de <http://worldclim.org/version2>
- Hidalgo, H. G., Amador, J. A., Alfaro, E. J., & Quesada, B. (2013). Hydrological climate change projections for central America. *Journal of Hydrology*, 495, 94-112. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.05.004
- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J. (2015). Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America. *International Journal of Climatology*, 35(12), 3397-3421. doi:10.1002/joc.4216
- Holdridge, L. R., & Tosi, J. A. (1967). *Life zone ecology (Rev.ed. ed.)*. San Jose, Costa Rica: Trop.Science Center.

- IPCC. (2014). Climate change 2014 synthesis report [Abstract]. Recuperado de http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- IPCC. (2017). Proceso de escenario para AR5. Recuperado de http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenarioproces/RCPs.html
- Karmalkar A. V., Bradley R. S., & Diaz H. F. (2008). Climate change scenario for Costa Rican montane forests. *Geophysical Research Letters*, 35(11), L11702. doi:10.1029/2008GL033940
- Landis J. Richard, Koch Gary G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. doi:10.2307/2529310
- Jiménez G., R., Vindas H., R. (2011). The administration of the hydric resource and the climate change in Costa Rica (2000-2010). Recuperado de <http://biblioteca.clacso.edu.ar/gsd/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=cr/cr-007&d=article142oai>
- Jiménez, M. (2009). Resiliencia de los ecosistemas naturales terrestres de costa rica al cambio climático. (Tesis de posgrado maestría) Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. Recuperado de <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/3854>
- Jiménez, M., Chain, A., Locatelli, B. (2010). Efectos del cambio climático en la distribución de zonas de vida en Centroamérica; *Recursos Naturales Y Ambiente*, (59-60), 32-40.
- Khatun, K., Imbach, P., & Zamora, J. (2013). An assessment of climate change impacts on the tropical forests of Central America using the Holdridge life zone (HLZ) land classification system. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 6(4), 183-189. doi:10.3832/ifor0743-006
- Lizarazo, I. (2013). Introducción al procesamiento de imágenes usando GRASS GIS 7.0-versión 0.3; Recuperado de https://download.tuxfamily.org/tuxgis/geodescargas/il_pdi_grass_0.3.pdf
- Lugo, A. E., Brown, S. L., Dodson, R., Smith, T. S., Shugart, H. H. (1999). The Holdridge life zones of the conterminous united states in relation to ecosystem

mapping. *Journal of Biogeography*, 26(5), 1025-1038. doi:10.1046/j.1365-2699.1999.00329.x

Maurer, E., Roby, N., Stewart-Frey, I., & Bacon, C. (2017). Projected twenty-first-century changes in the Central American mid-summer drought using statistically downscaled climate projections. *Regional Environmental Change*, 17(8), 2421-2432. doi:10.1007/s10113-017-1177-6

Ministerio de Ambiente y Energía, (MINAE), Instituto Meteorológico Nacional, (, Dirección de Cambio Climático, (DCC), Comisión Nacional de Emergencias, (CNE), Ministerio de Planificación y Política Económica, (MIDEPLAN), & Secretaría de Planificación Sectorial de Ambiente. (2018). Política nacional de adaptación al cambio climático de costa rica 2018-2030. Recuperado de <https://cambioclimaticocr.com/recursos/documentos/biblioteca/final-politica-adaptacion-24-abril.pdf>

Naciones Unidas. (1992). CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. Recuperado de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

Parry, M., Canziani, O., van Ypersele de Strihou, Jean-Pascal, & Palutikof, J. (2007). *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. New-York: Cambridge University Press. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2078.1/161642>

Rodríguez, M. (2002). Influencia del cambio climático global sobre la producción agropecuaria Argentina., 15-28. Recuperado de http://200.16.86.38/uca/common/grupo5/files/vol20_3.pdf

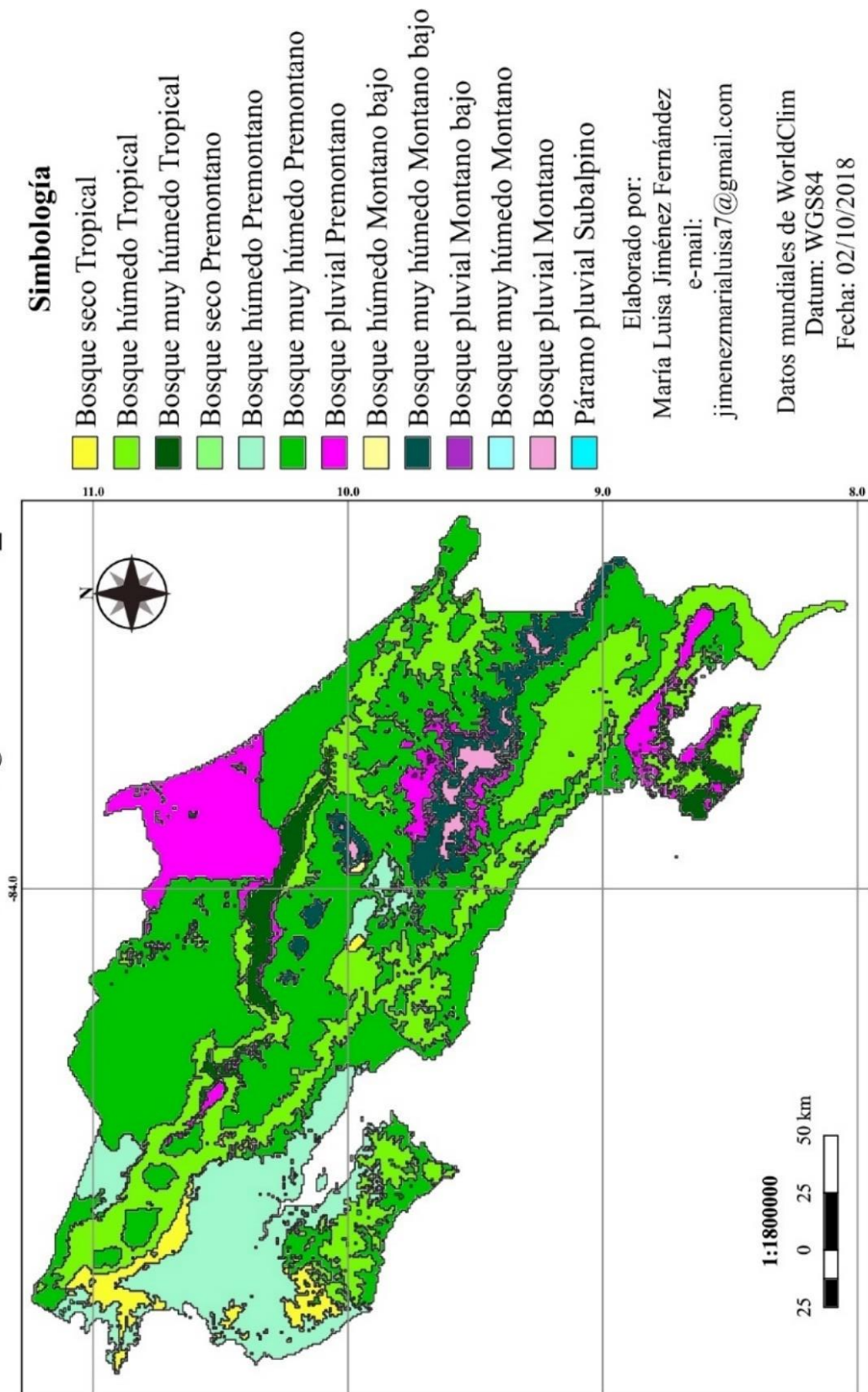
Rosito, J., Pérez Irungaray, G., Maas, R., Gándara, A., & Gálvez, J. (2012). Bases para el seguimiento y evaluación del cambio climático en los ecosistemas de Guatemala. Perfil ambiental de Guatemala 2010-2012. vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo. (pp. 269-297). Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA), Universidad Rafael Landívar (URL): Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/304823041_Bases_para_el_seguimiento_y_evaluacion_del_cambio_climatico_en_los_ecosistemas_de_Guatemala

- Vargas, O. (2012). Disturbios en los páramos andinos. ResearchGate, Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/260438569_Disturbios_en_los_paramos_andinos
- Yates, D., Kittel, T., Cannon, R. (2000). Comparing the correlative Holdridge model to mechanistic biogeographical models for assessing vegetation distribution response to climatic change. *Climatic Change*, 44(1), 59-87. doi:1005495908758
- Zheng, Y., Xie, Z., Jiang, L., Shimizu, H., Drake, S. (2006). Changes in Holdridge life zone diversity in the Xinjiang Uygur Autonomous Region (XUAR) of china over the past 40 years. *Journal of Arid Environments*, 66(1), 113-126. doi: 10.1016/j.jaridenv.2005.09.005

7. ANEXOS

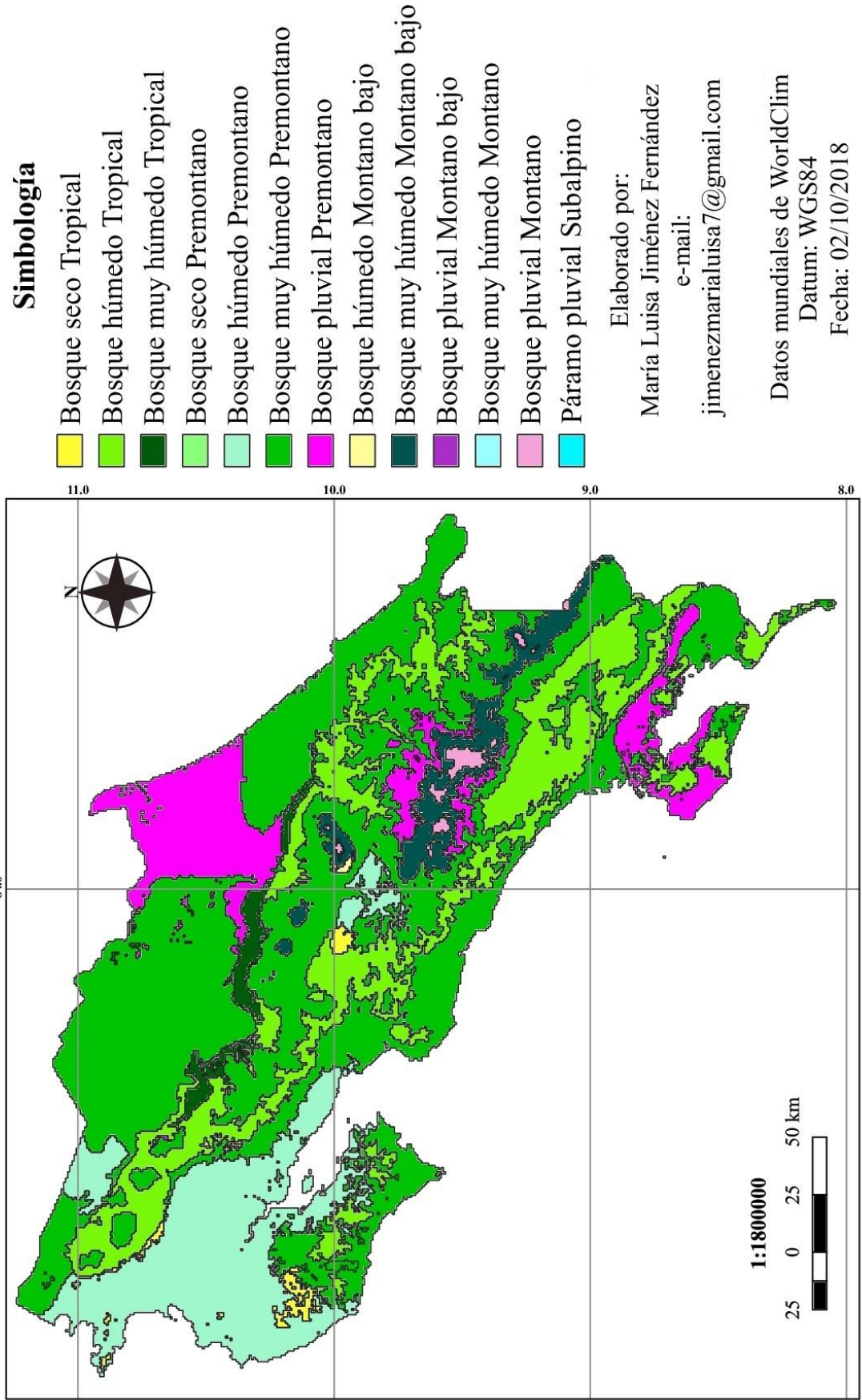
Anexo 1. Mapa de zonas de vida en Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: "cnmr_cm5" RCP 4.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: "cnmr_cm5" RCP 4.5**

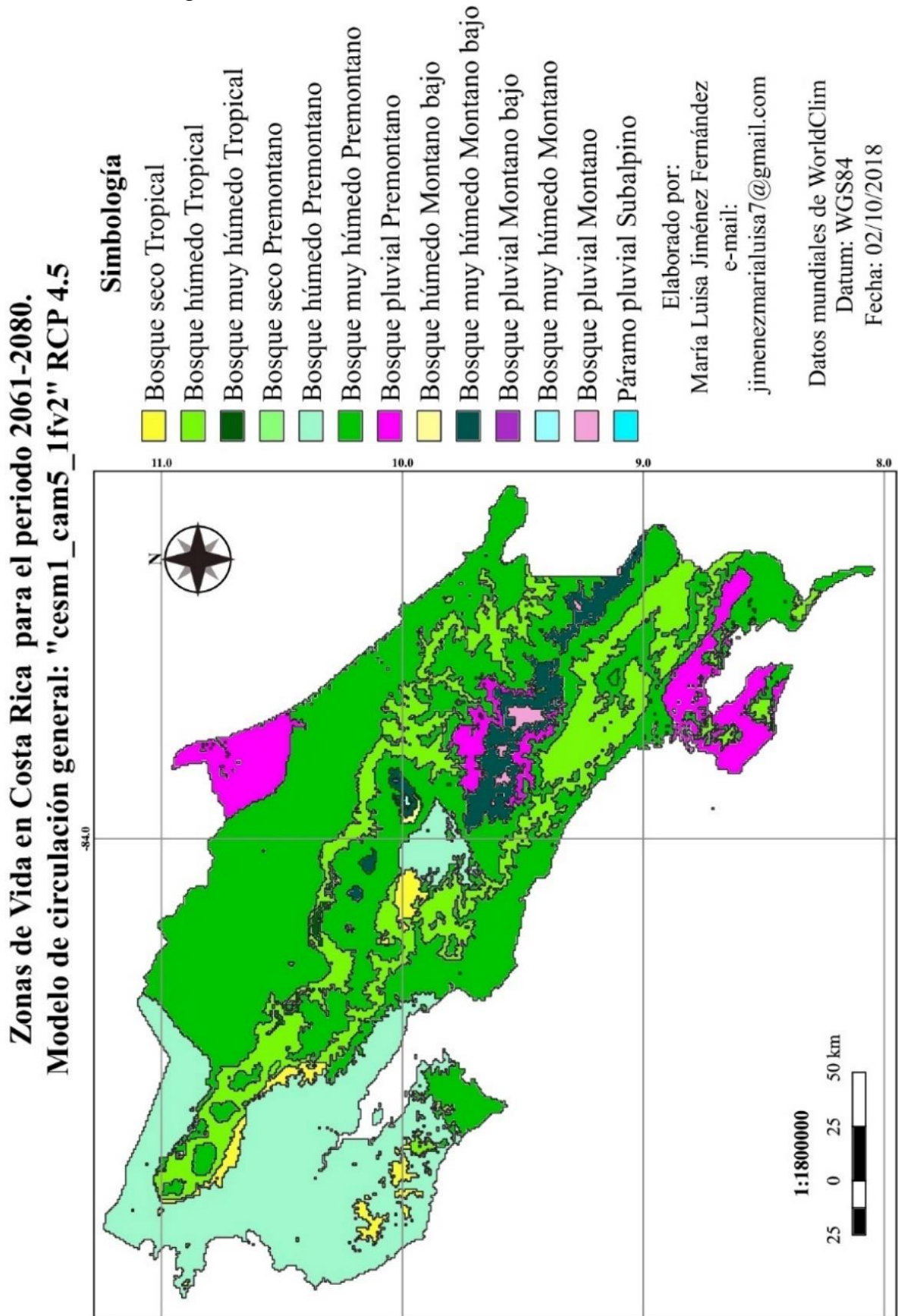


Anexo 2. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: "cnmr_cm5" RCP 8.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: "cnmr_cm5" RCP 8.5**

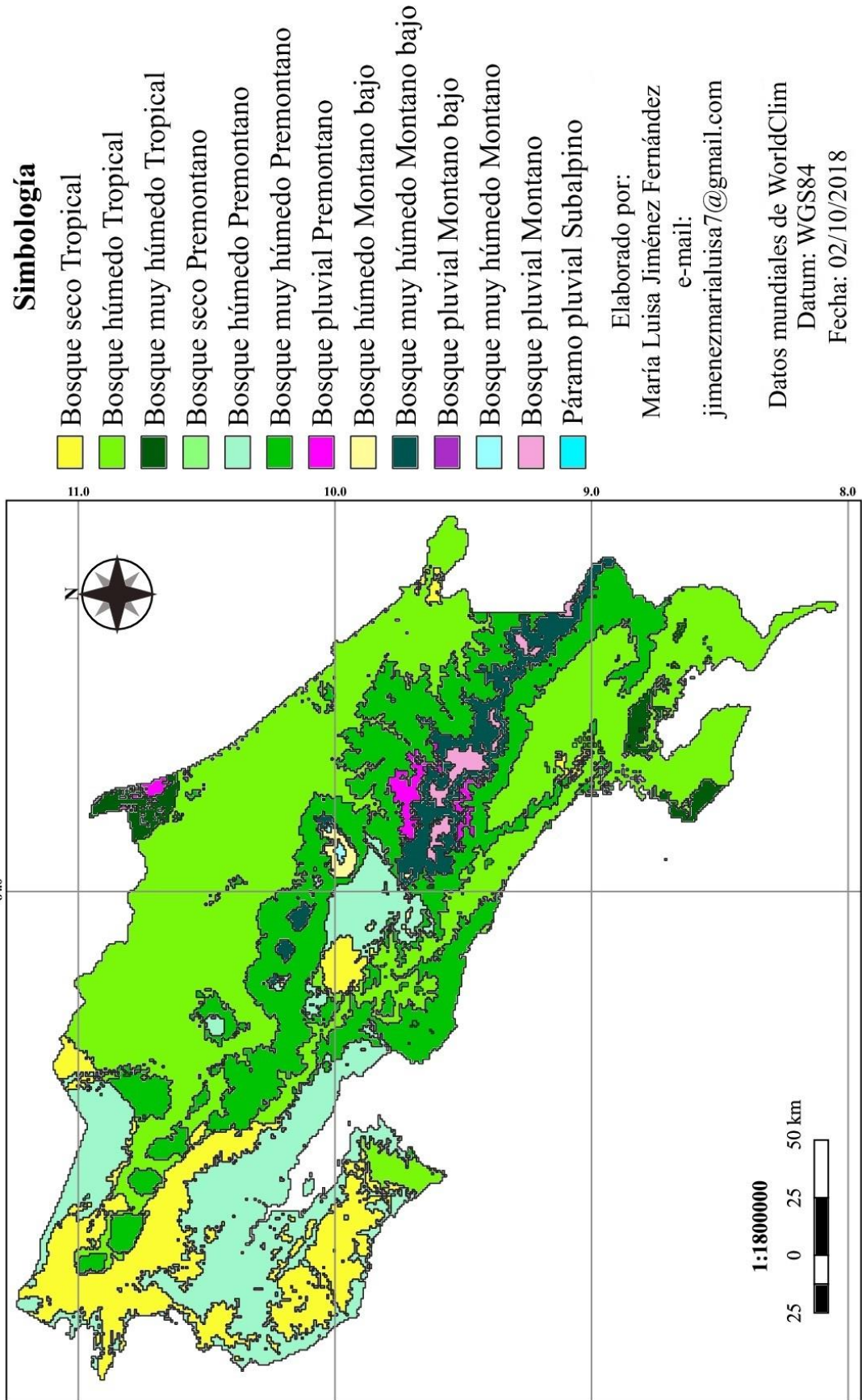


Anexo 3. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: "cesm1_cam5_1fv2" RCP 4.5



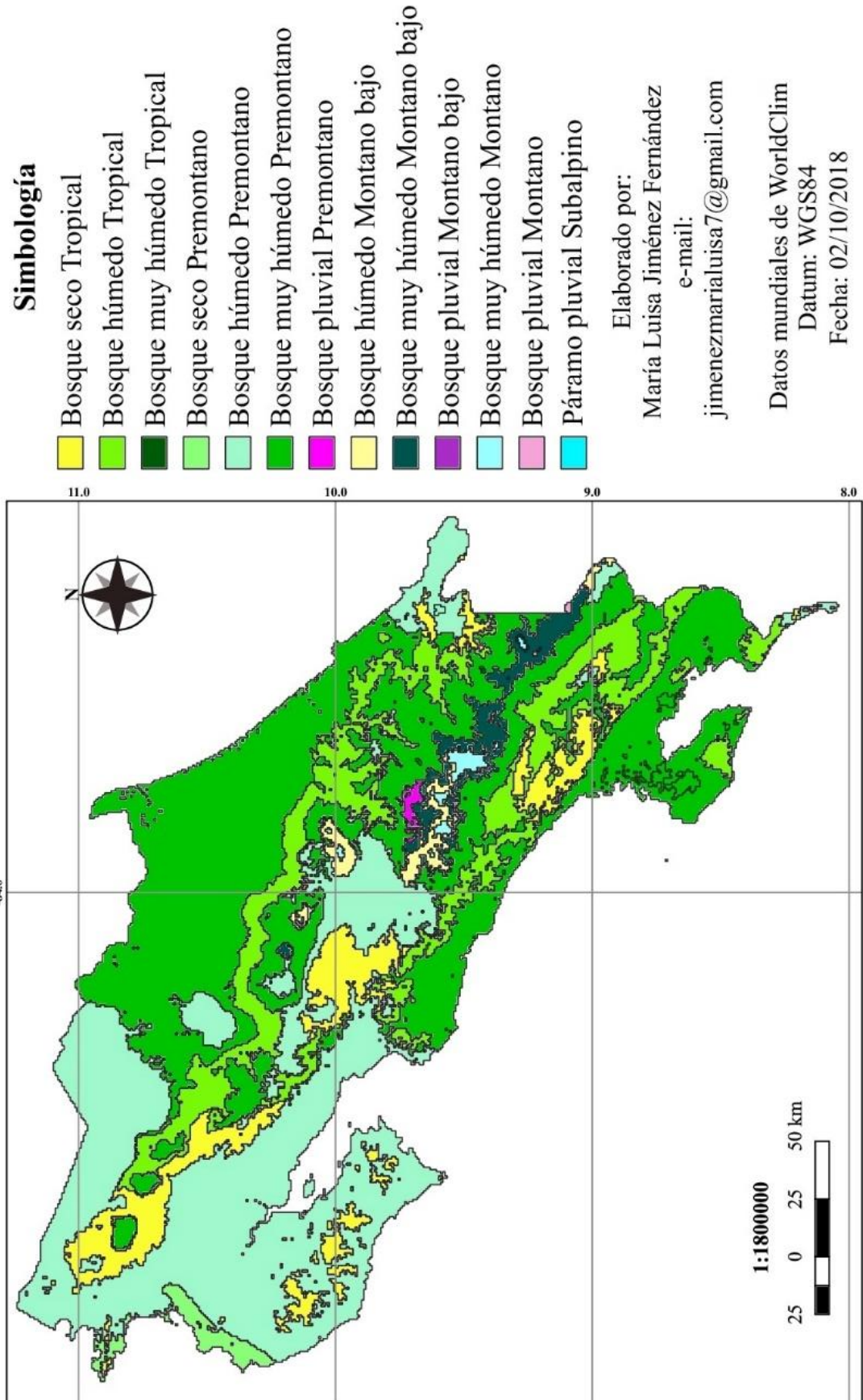
Anexo 4. Mapa de zonas de vida en Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “ccsm4” RCP 4.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: “ccsm4” RCP 4.5**



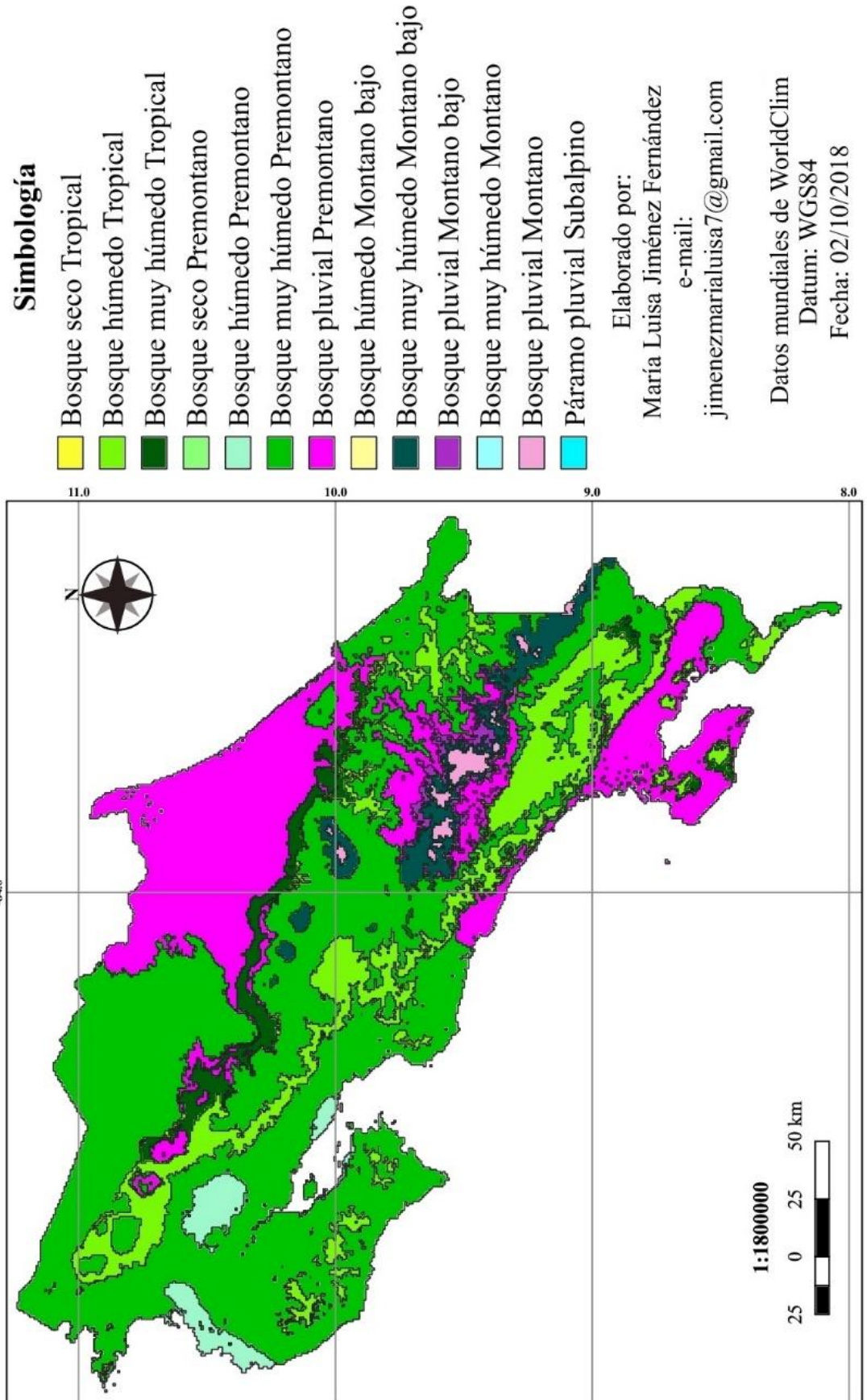
Anexo 5. Mapa de zonas de vida en Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: "ccsm4" RCP 8.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: "ccsm4" RCP 8.5**



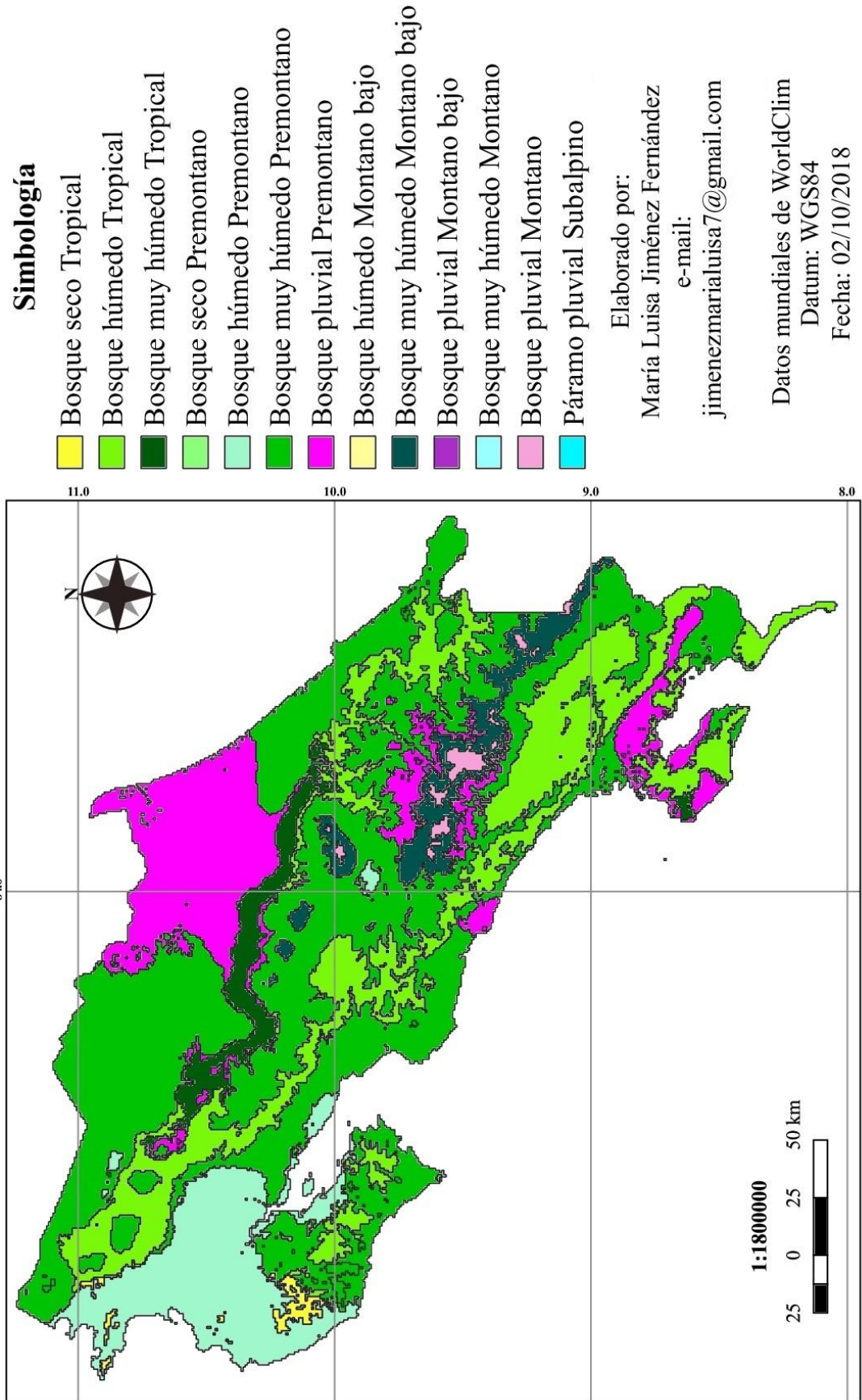
Anexo 6. Mapa de zonas de vida en Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “mpi_esm_lr” RCP 4.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: “mpi_esm_lr” RCP 4.5**



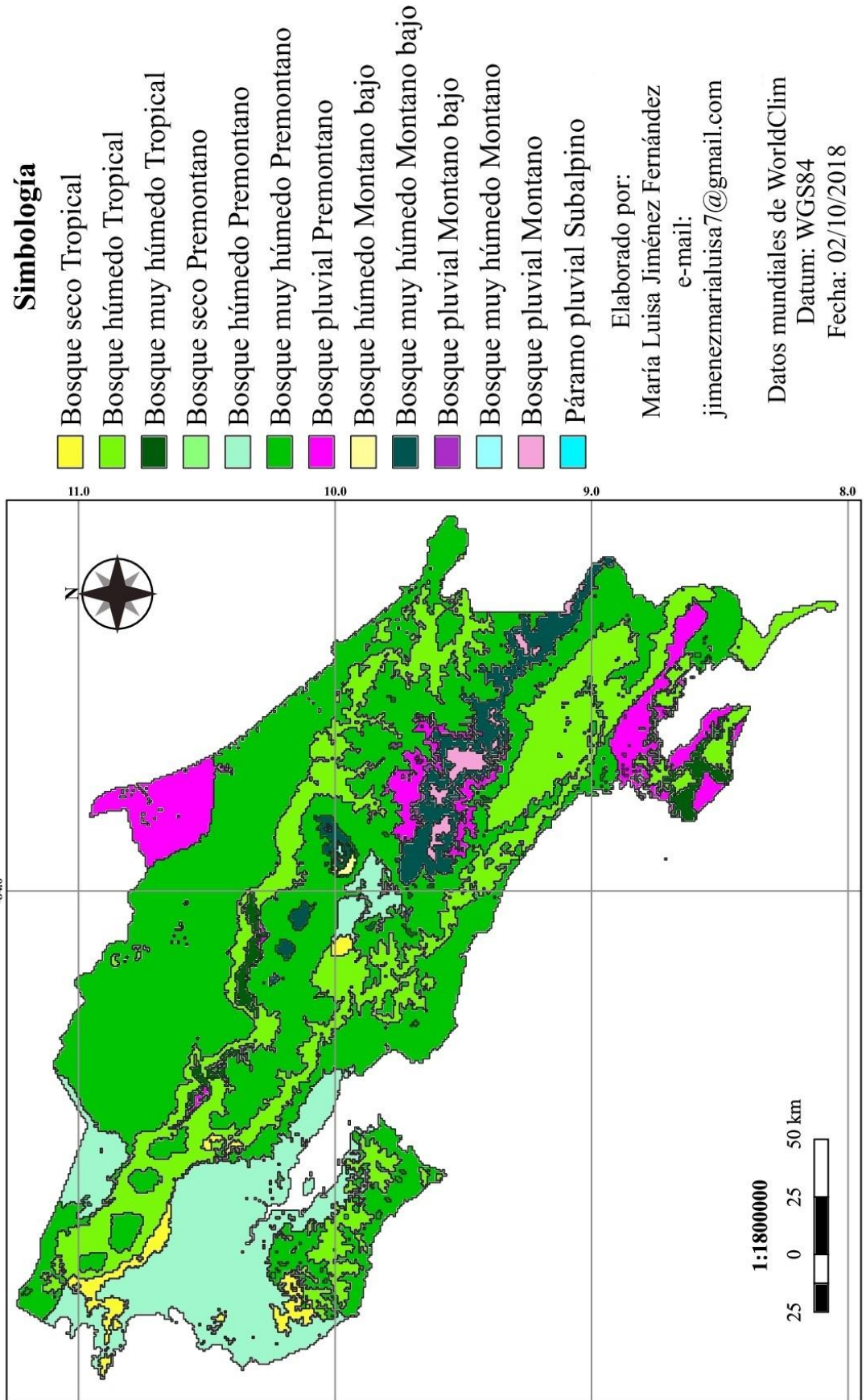
Anexo 7. Mapa de zonas de vida en Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “mpi_esm_lr” RCP 8.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: “mpi_esm_lr” RCP 8.5**



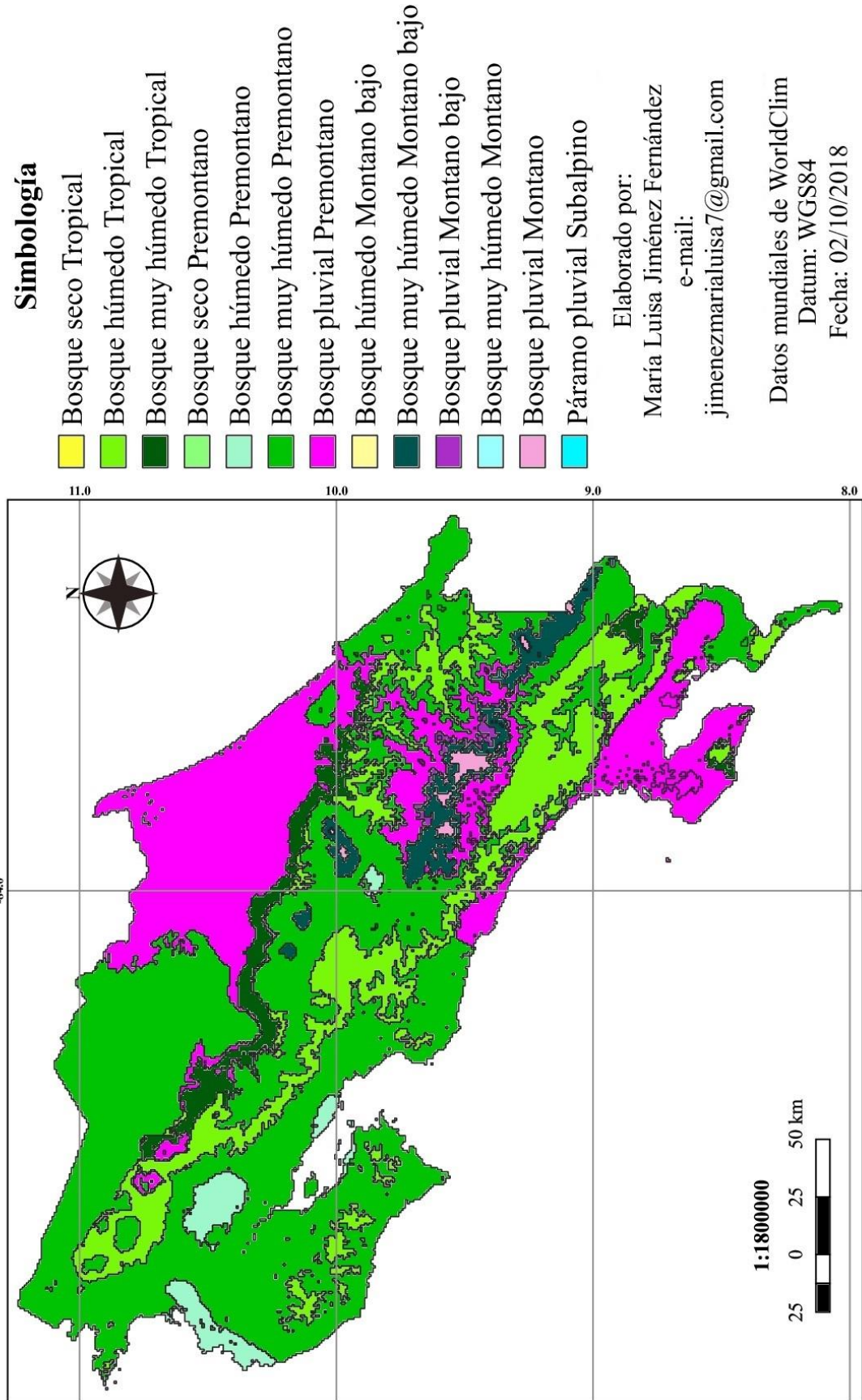
Anexo 8. Mapa de zonas de vida en Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “mri_cgcm3” RCP 4.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: “mri_cgcm3” RCP 4.5**



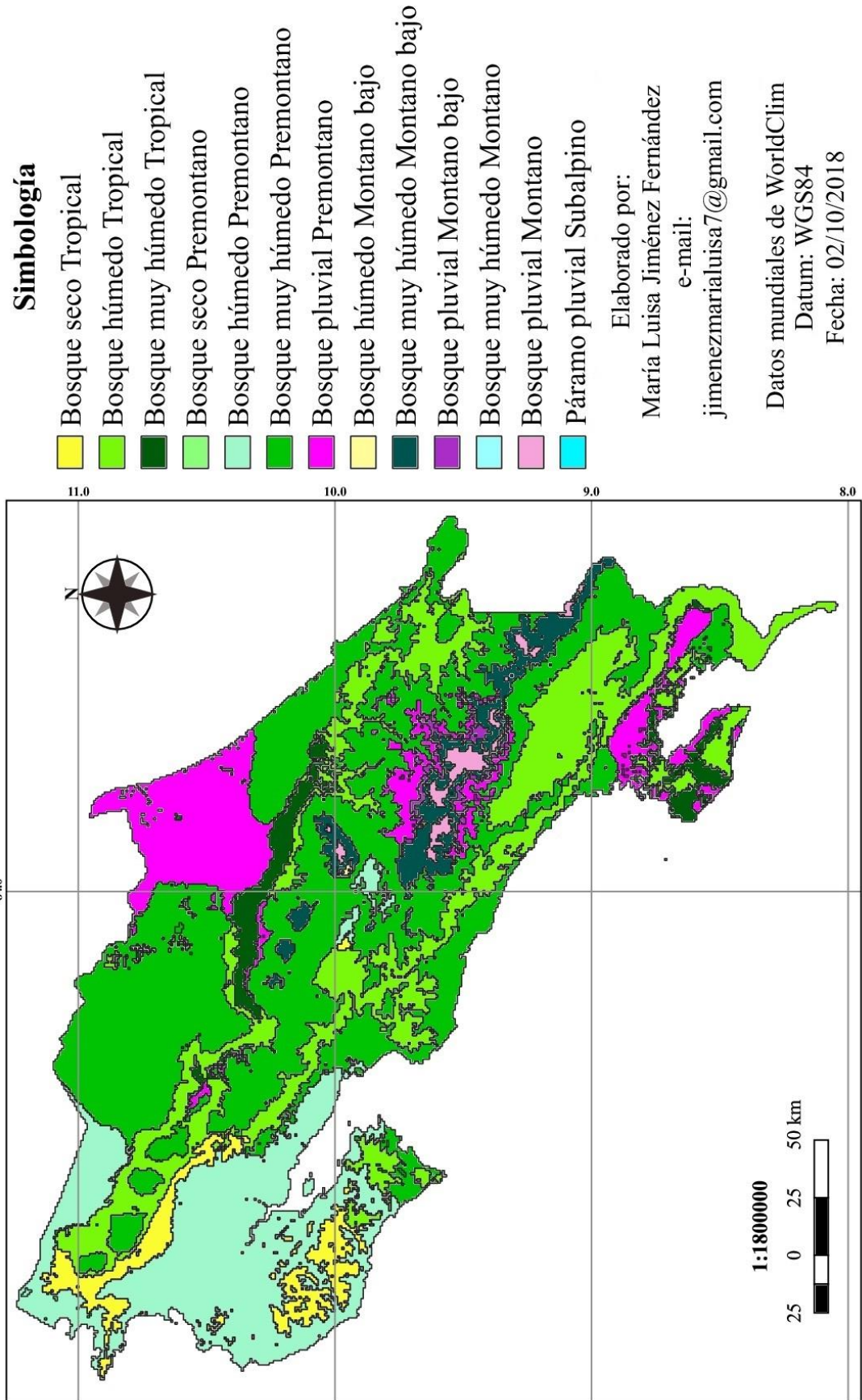
Anexo 9. Mapa de zonas de vida en Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: "mri_cgcm3" RCP 8.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: "mri_cgcm3" RCP 8.5**



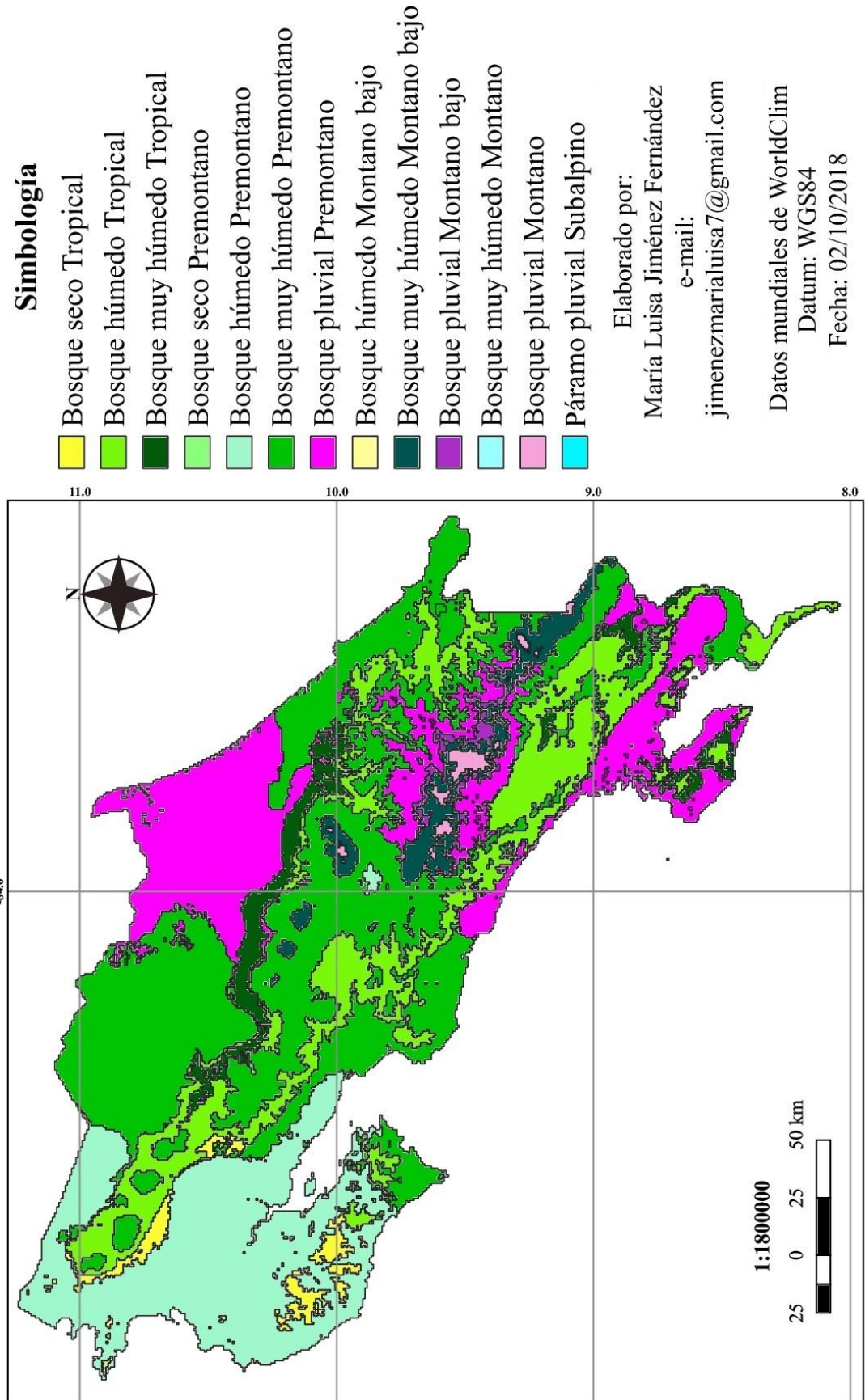
Anexo 10. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “giss-e2-r” RCP 4.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: "giss-e2-r" RCP 4.5**



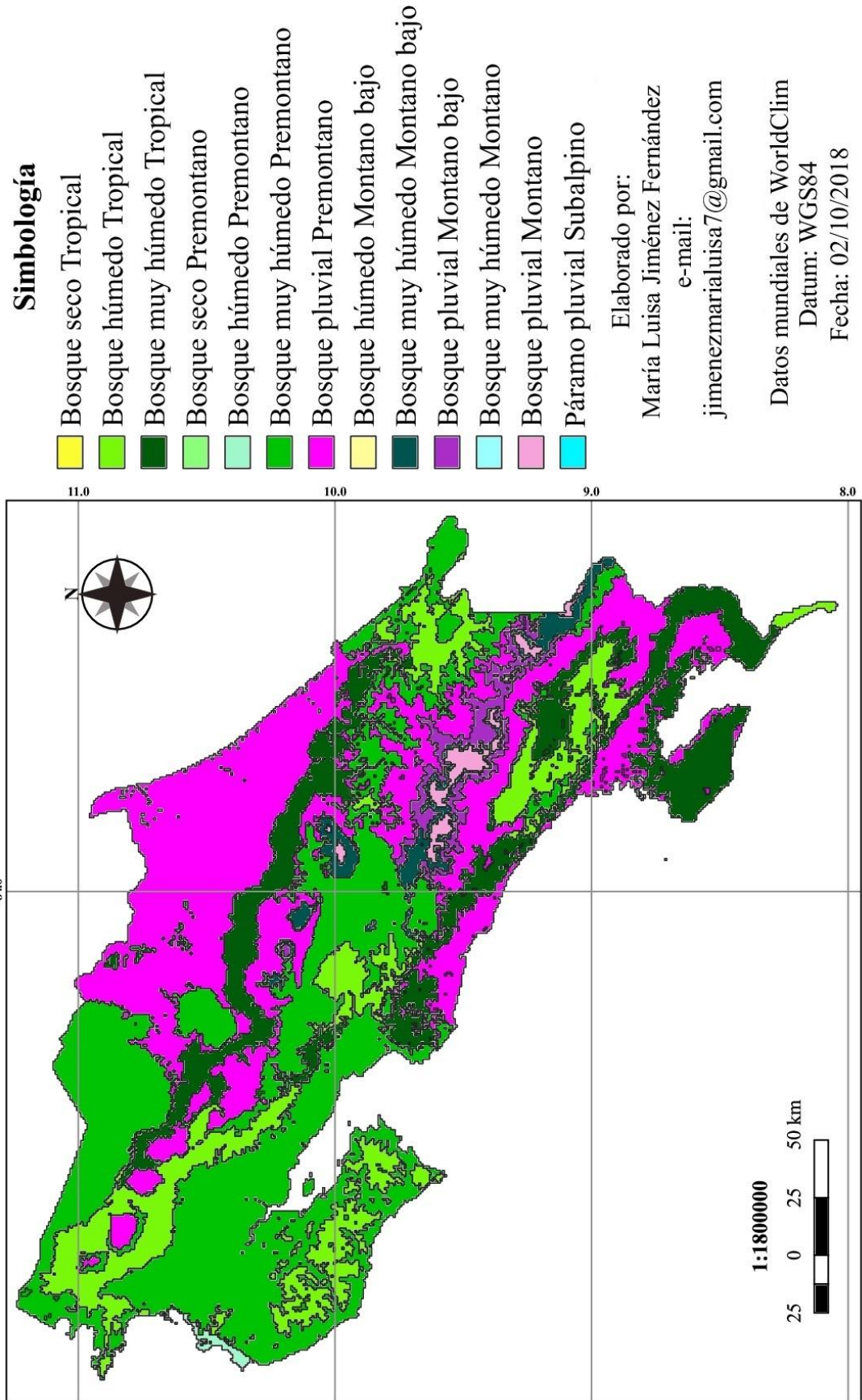
Anexo 11. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: "giss-e2-r" RCP 8.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: "giss-e2-r" RCP 8.5**



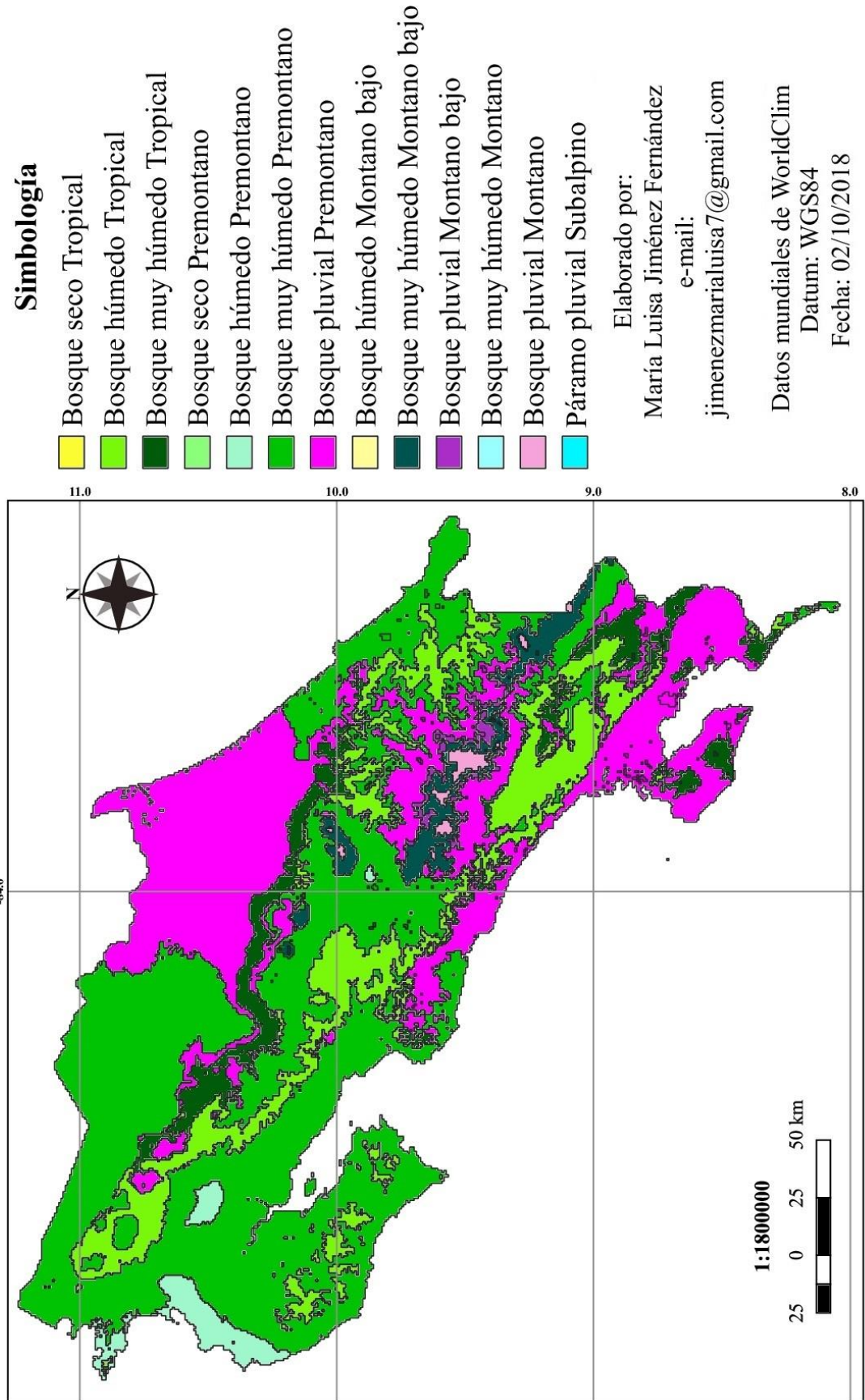
Anexo 12. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “miroc_5” RCP 4.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: “miroc_5” RCP 4.5**



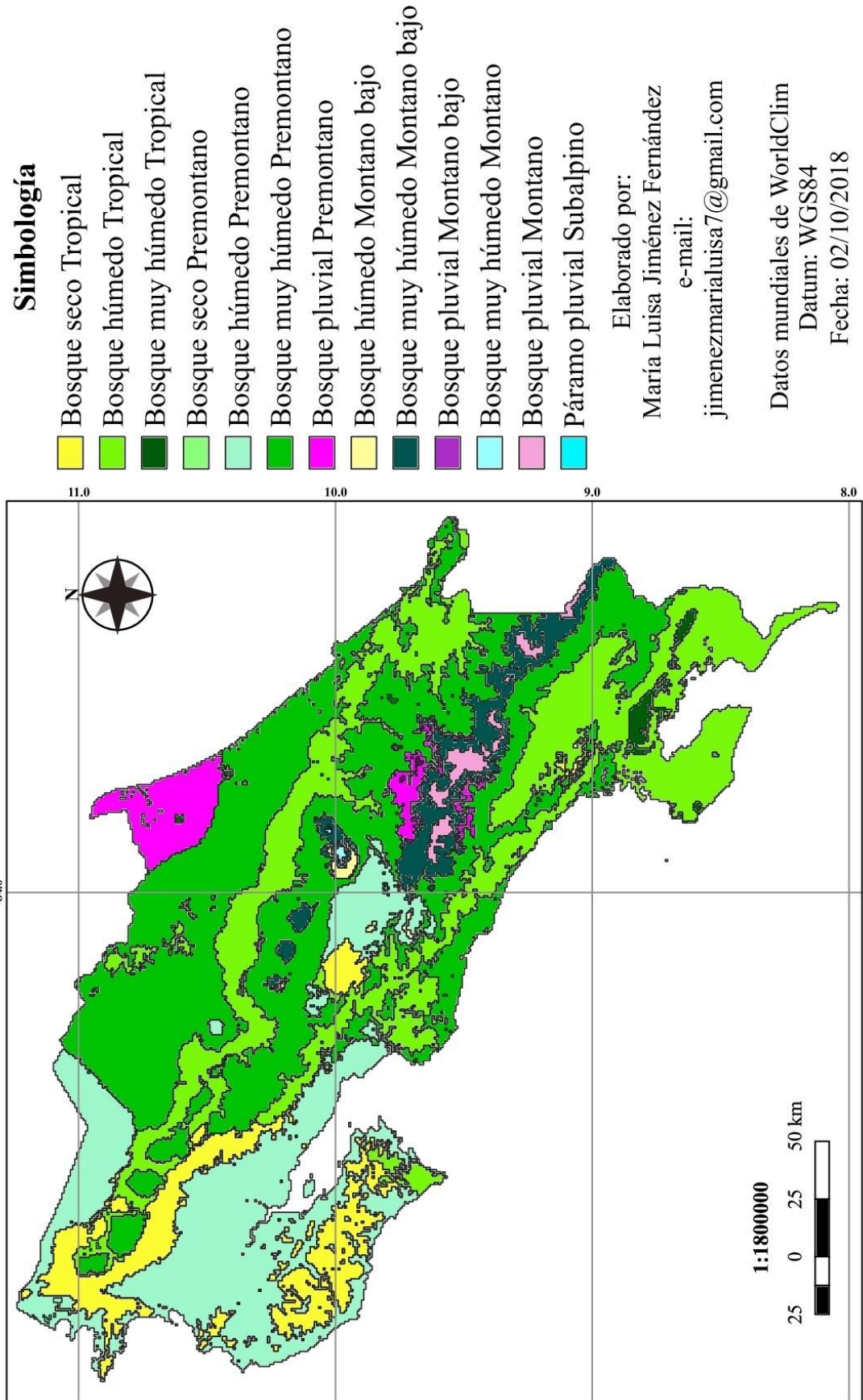
Anexo 13. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “miroc” RCP 8.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: “miroc_5” RCP 8.5**

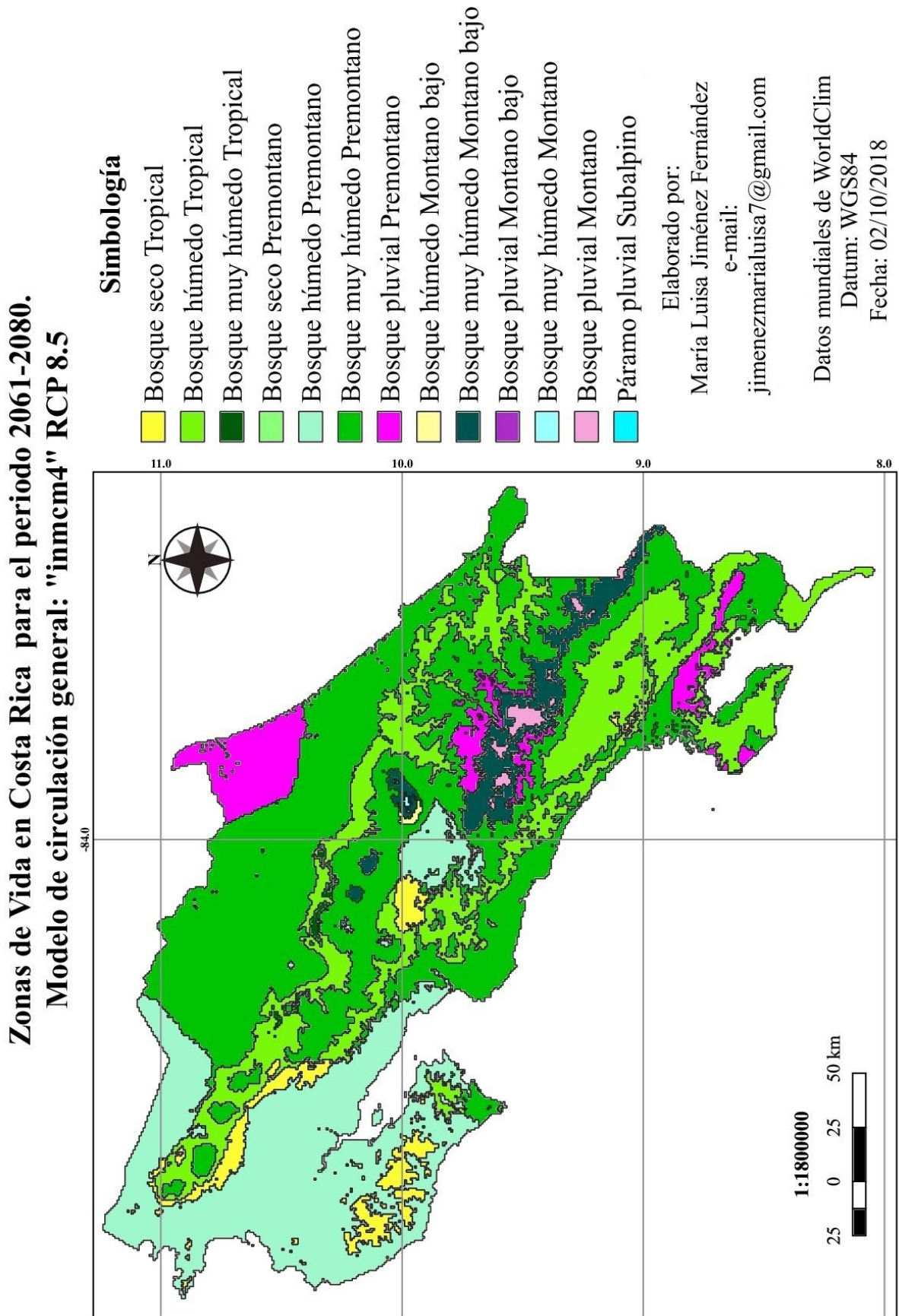


Anexo 14. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “inmcm4” RCP 4.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: “inmcm4” RCP 4.5**

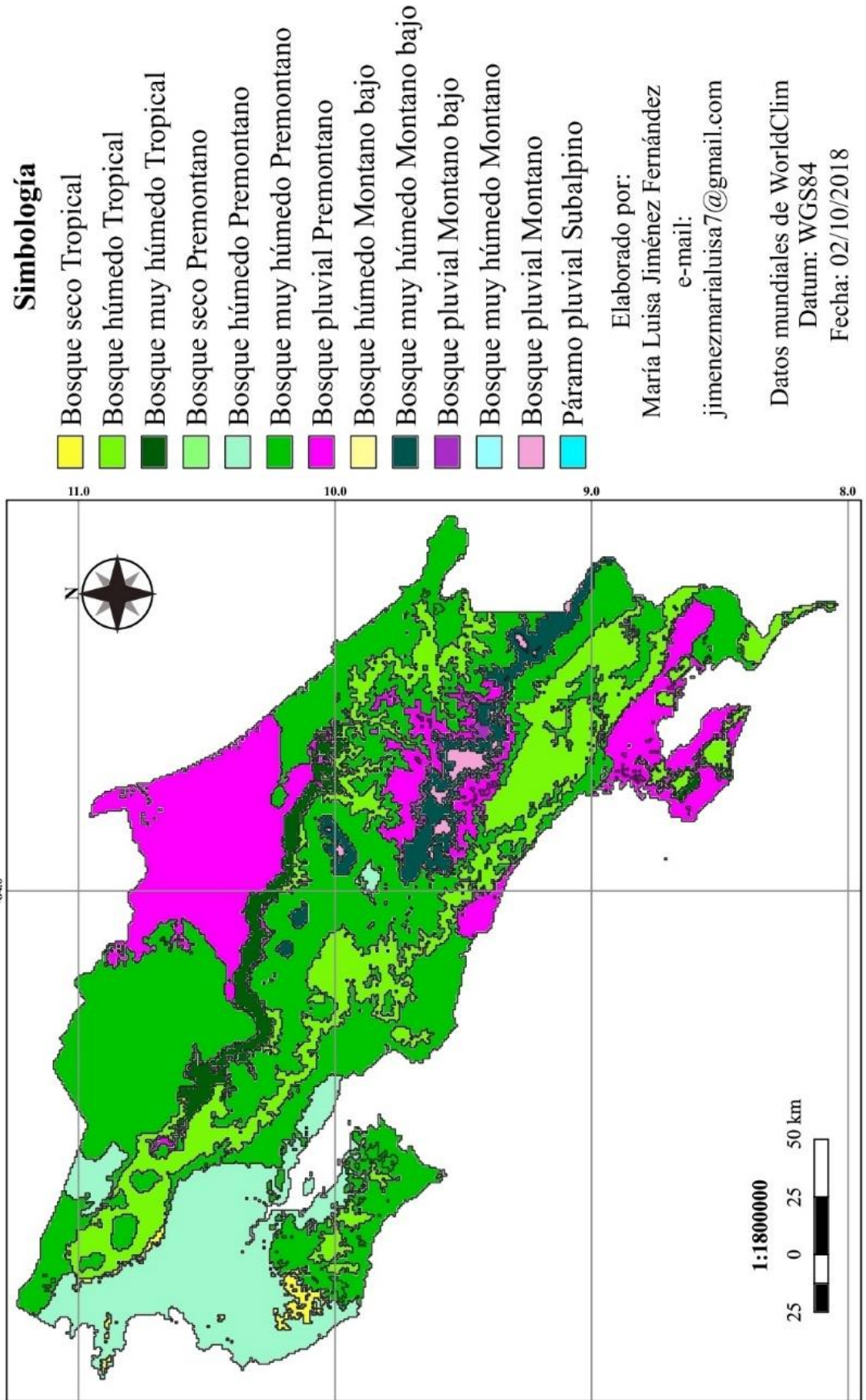


Anexo15. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “inmcm4” RCP 8.5



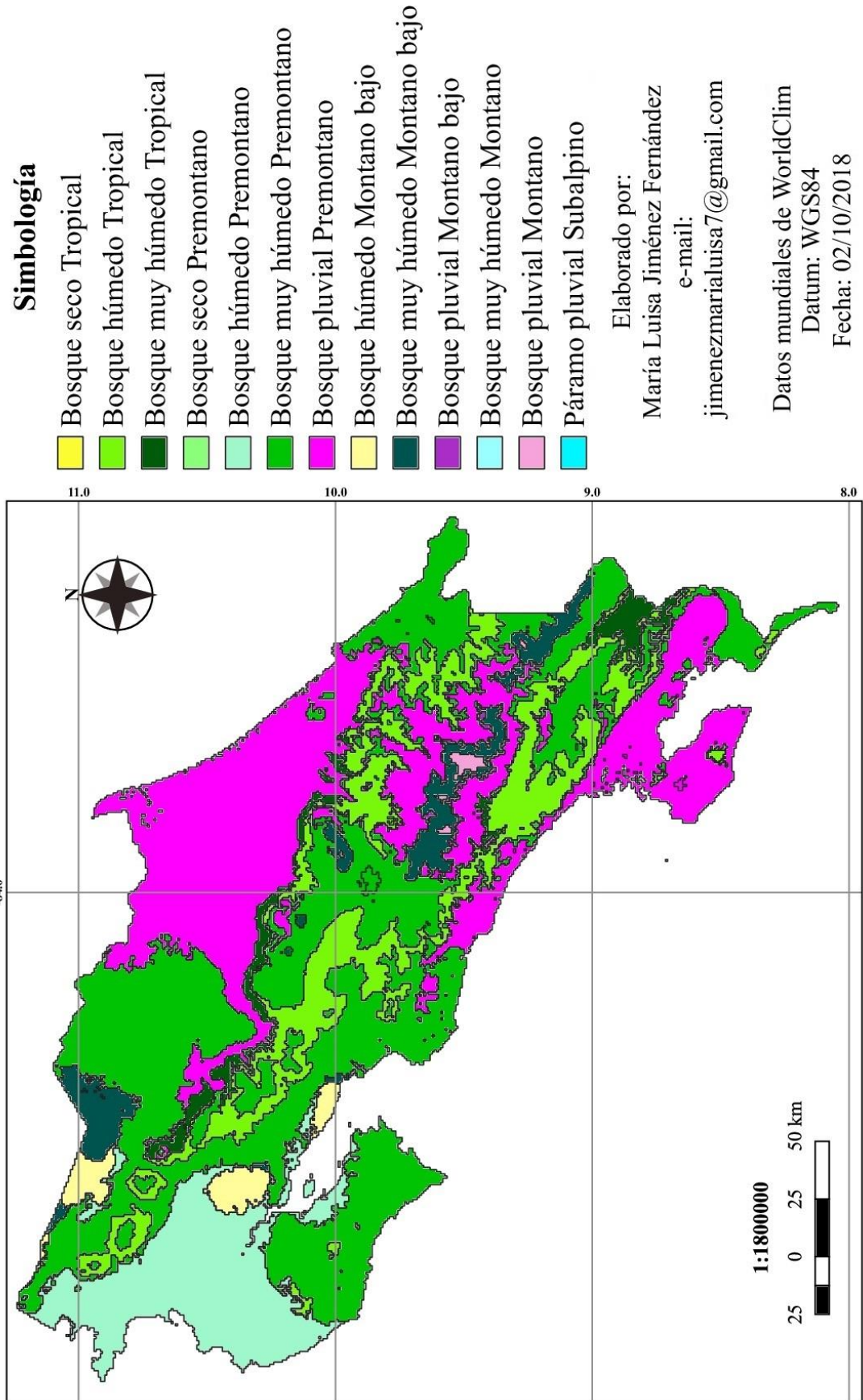
Anexo 16. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: "hadgem2-cc" RCP 4.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: "hadgem2-cc" RCP 4.5**



Anexo 17. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: "hadgem2-cc" RCP 8.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: "hadgem2-cc" RCP 8.5**



Anexo 18. Mapa de zonas de vida em Costa Rica para el período 2061-2080. Modelo de circulación general: “gfdl-esm2g” RCP 4.5

**Zonas de Vida en Costa Rica para el periodo 2061-2080.
Modelo de circulación general: "gfdl-esm2g" RCP 4.5**

